

ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

СПРАВОЧНИК

*под редакцией
академика
И. К. КИКОИНА*



МОСКВА · АТОМИЗДАТ · 1976

Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. акад. И. К. Кикоина. М., Атомиздат, 1976, 1008 с.

Справочник содержит данные по механическим, термодинамическим и молекулярно-кинетическим свойствам веществ, электрическим свойствам металлов, диэлектриков и полупроводников, магнитным свойствам диа-, пара- и ферромагнетиков, оптическим свойствам веществ, в том числе и лазерных, оптическим, рентгеновским и мёссбауэровским спектрам, нейтронной физике, термоядерным реакциям, а также геофизике и астрономии.

Материал представлен в виде таблиц и графиков, сопровождаемых краткими объяснениями и определениями соответствующих величин. Для удобства пользования приведены единицы измерения физических величин в различных системах и переводные множители.

В работе над справочником принимали участие

В. Г. АВЕРИН (гл. 7 и 14)	Е. А. ЛОБИКОВ (гл. 43)
Б. А. АРОНЗОН (гл. 21)	М. А. МАЗИНГ (гл. 31)
Н. С. БАБАЕВ (гл. 4, 5, 6, 16)	А. А. МАЛЮТИН (гл. 32, 33, 34)
Н. А. БАБУШКИНА (гл. 1, 2, 25, 26)	И. А. МАСЛОВ (гл. 47)
А. И. БАЗЬ (гл. 40)	Е. З. МЕЙЛИХОВ (гл. 21)
В. И. БОЛОШИН (гл. 32)	А. И. МИГАЧЕВ (гл. 12)
А. А. ВАРФОЛОМЕЕВ (гл. 45)	С. А. МИРОНОВ (гл. 29)
Л. И. ВИНОКУРОВА (гл. 27)	В. М. НОВИКОВ (гл. 35, 36)
Э. Б. ГЕЛЬМАН (гл. 8, 9, 10, 11, 13)	В. И. ОЖОГИН (гл. 30)
И. С. ГРИГОРЬЕВ (гл. 15, 18, 22, 39, 40, 41, 42, 45, 46)	Я. С. ПЕТУХОВА (гл. 24)
А. В. ЕЛЕЦКИЙ (гл. 17)	Р. В. ПИСАРЕВ (гл. 29)
Т. Н. ИГОШЕВА (гл. 20, 28)	Л. П. ПРЕСНЯКОВ (гл. 31)
К. А. КИКОИН (гл. 3)	А. П. СЕНЧЕНКОВ (гл. 19, 20, 23, 44)
В. Ф. КИТАЕВА (гл. 31)	Р. В. СЕРОВ (гл. 33)
В. М. КУЛАКОВ (гл. 37)	В. Г. ШАПИРО (гл. 30)
С. Д. ЛАЗАРЕВ (гл. 21)	В. М. ШАТИНСКИЙ (гл. 37)
Т. М. ЛИФШИЦ (гл. 24)	В. П. ШЕВЕЛЬКО (гл. 22, 31, 32, 34)
	С. С. ЯКИМОВ (гл. 38)

На первоначальном этапе работы над справочником координацию деятельности авторов-составителей осуществляли А. П. Сенченков и И. С. Григорьев. Обработка окончательного варианта выполнена И. С. Григорьевым, Ю. А. Даниловым и Е. З. Мейлиховым.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От редактора	9
1. ОБЩИЙ РАЗДЕЛ	
Глава 1. Единицы измерения физических величин	
1.1. Международная система единиц (СИ)	10
1.2. Единицы измерения механических величин	13
1.3. Единицы измерения тепловых величин	18
1.4. Единицы измерения электромагнитных величин	21
1.5. Единицы измерения акустических величин	21
1.6. Единицы измерения световых величин	22
1.7. Единицы измерения радиоактивности и ионизирующих излучений	23
1.8. Некоторые единицы измерения в атомной и ядерной физике	24
Приложение. Некоторые формулы электродинамики, записанные в различных системах единиц	25
Примечание. О проекте нового ГОСТа единиц физических величин	29
Список литературы	30
Глава 2. Фундаментальные физические постоянные	
Список литературы	33
Глава 3. Периодическая система элементов	
Список литературы	36
II. МЕХАНИКА И ТЕРМОДИНАМИКА	
Глава 4. Механические свойства материалов	
4.1. Металлы	37
4.2. Стали	38
4.3. Сплавы цветных металлов	40
Сплавы алюминия	40
Сплавы меди	44
Сплавы никеля, кобальта и свинца	48
Сплавы олова	49
Сплавы титана	50
Сплавы цинка	51
Сплавы платины	51
Сплавы вольфрама	51
4.4. Металлокерамика, пластмассы и другие материалы	52
Металлокерамические твердые сплавы	52
Биметаллы	52
Пластмассы	53
Технические резины	54
4.5. Минералы и волокна	54
Твердость минералов	54
Свойства волокон и проволок	55
Список литературы	55

Глава 5. Плотность веществ	
5.1. Элементы	56
5.2. Газы и пары	57
5.3. Жидкости	58
5.4. Водные растворы	59
Плотность водного раствора этилового спирта	59
Плотность водного раствора метилового спирта	59
Плотность водных растворов веществ при различных температурах	60
5.5. Сплавы	65
5.6. Дерево, минералы и другие вещества	66
Список литературы	66
Глава 6. Сжимаемость веществ	
6.1. Газы	67
6.2. Жидкости	71
6.3. Твердые тела	75
Список литературы	75
Глава 7. Акустика	
7.1. Распространение звука в газах и парах	76
7.2. Распространение звука в жидкостях	79
7.3. Распространение звука в твердых телах и расплавах	86
Список литературы	90
Глава 8. Термометрия	
8.1. Температурные шкалы	91
8.2. Жидкостно-стеклянные термометры	93
8.3. Термометры сопротивления	94
8.4. Термоэлектрическая термометрия	96
8.5. Колебательные термометры	102
8.6. Оптическая термометрия (пирометрия) и термомондкаторы	105
Список литературы	109
Глава 9. Температурные коэффициенты расширения и эффект Джоуля — Томсона	
9.1. Тепловое расширение анизотропных твердых тел	110
9.2. Тепловое расширение изотропных твердых тел	114
9.3. Тепловое расширение жидкостей и газов	125
9.4. Эффект Джоуля — Томсона	138
Список литературы	141
Глава 10. Теплоемкость	
10.1. Теплоемкость элементов и химических соединений при нормальных условиях	142
10.2. Теплоемкость элементов в зависимости от температуры при нормальном давлении	147
10.3. Теплоемкость неорганических соединений в зависимости от температуры при нормальном давлении	151

10.4. Теплоемкость органических соединений в зависимости от температуры при нормальном давлении	154	16.8. Вязкость органических соединений	281
10.5. Теплоемкость C_p и отношение C_p/C_v для газов и жидкостей при различных значениях температуры и давления	155	16.9. Вязкость кремнийорганических соединений	284
10.6. Растворы и жидкие смеси	161	16.10. Вязкость углеводородов	284
10.7. Сплавы	162	16.11. Вязкость нуклидов и их соединений	286
10.8. Технические материалы	164	Список литературы	287
10.9. Теплоемкость при фазовых переходах	165		
Список литературы	170		
Глава 11. Фазовые переходы, плавление и кипение		Глава 17. Диффузия атомов и молекул	
11.1. Температура и скрытая теплота фазовых переходов	171	17.1. Диффузия в газах	287
11.2. Плавление	185	Коэффициент самодиффузии газов	287
11.3. Кипение	192	Коэффициенты взаимной диффузии в газах	288
11.4. Кипение и затвердевание растворов	196	Диффузия заряженных частиц в газе. Амби-полярная диффузия	290
Список литературы	198	17.2. Диффузия в жидкостях	291
		17.3. Диффузия в твердых телах	296
Глава 12. Давление пара различных веществ		Список литературы	301
12.1. Вода и ртуть	199	Глава 18. Эффективные размеры атомов и ионов	
12.2. Элементы и простейшие соединения	200	Список литературы	303
12.3. Неорганические вещества	203		
12.4. Органические вещества	211	IV. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ	
Список литературы	241	Глава 19. Электрические свойства металлов и сплавов	
Глава 13. Критические параметры веществ и вириальные коэффициенты		19.1. Введение	304
13.1. Вириальные коэффициенты	242	19.2. Чистые металлы	304
13.2. Параметры критической точки перехода жидкость — пар	245	19.3. Влияние давления на проводимость металлов	309
Список литературы	249	19.4. Сверхпроводники	310
Глава 14. Коэффициент поверхностного натяжения		19.5. Электрические свойства некоторых металлов и сплавов	312
14.1. Жидкости	250	19.6. Электрические свойства специальных электротехнических сплавов	317
14.2. Твердые тела	255	19.7. Электрические свойства сплавов железа и меди	319
Список литературы	255	Список литературы	320
III. КИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ		Глава 20. Электрические свойства диэлектриков	
Глава 15. Теплопроводность		20.1. Введение	320
15.1. Элементы	256	20.2. Проводимость, пробивное напряжение, диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь	320
15.2. Газы и пары	261	20.3. Электрические свойства наиболее распространенных диэлектриков	328
15.3. Жидкости	262	20.4. Сегнетоэлектрики	333
15.4. Сплавы	264	20.5. Пьезоэлектрики	335
15.5. Огнеупорные материалы и высокотемпературные композиции ядерного горючего	267	Список литературы	340
15.6. Строительные и теплоизоляционные материалы, древесные породы и прочие вещества	269	Глава 21. Электрические свойства полупроводников	
Список литературы	271	21.1. Введение	341
Глава 16. Вязкость		21.2. Элементарные полупроводники	343
16.1. Вязкость газов и паров при давлении выше атмосферного	272	21.3. Кремний и германий	346
Водород	272	21.4. Полупроводниковые соединения:	357
Азот	272	Соединения типа $AI BV - AI BVII$	357
Кислород	272	Соединения типа $AII BV - AII BVII$	362
Гелий	272	Соединения типа $AIII BV - AIII BVII$	381
Аргон	272	Соединения типа $AIV BV - AIV BVII$	400
Воздух	273	Соединения типа $AV BV - AV BVII$	409
Оксид углерода	273	Соединения типа $AVI BV$ и $AVI BVII$	410
Углекислый газ	273	Соединения типа $AVII BV$ и $AVII BVII$	414
16.2. Вязкость газов при давлении ниже атмосферного	274	Соединения типа $AVIII BV - AVIII BVII$	414
16.3. Вязкость газов и паров при различных температурах	274	Список литературы	415
16.4. Вязкость водяного пара	278	Глава 22. Потенциалы ионизации и энергии диссоциации	
16.5. Константы Сесерленда	279	22.1. Потенциалы ионизации атомов	419
16.6. Вязкость элементов и неорганических соединений	279	22.2. Потенциалы ионизации молекул и радикалов	421
16.7. Кинематическая вязкость воды	281	22.3. Сродство к электрону и протону	423
		22.4. Фотоионизация атомов	424
		22.5. Перезарядка при атомных столкновениях	425
		22.6. Энергии диссоциации молекул	425

22.7. Энергии разрыва связей в молекулах и радикалах	426
Список литературы	427

Глава 23. Газовый разряд

23.1. Введение	427
23.2. Процессы на электродах	427
23.3. Подвижность и рекомбинация заряженных частиц	428
23.4. Слаботочные разряды	431
23.5. Дуговой разряд	433
23.6. Низкотемпературная плазма	436
23.7. Искровой разряд	439
23.8. Высокочастотный разряд	442
Список литературы	444

Глава 24. Электронная эмиссия

24.1. Введение	444
24.2. Работа выхода	444
24.3. Термоэлектронная эмиссия	445
Свойства термокатодов	447
24.4. Фотозлектронная эмиссия	450
Свойства фотокатодов	451
24.5. Вторичная электронная эмиссия	457
Коэффициенты вторичной электронной эмиссии и неупругого отражения электронов	457
Эффективные эмиттеры вторичных электронов	459
24.6. Автоэлектронная эмиссия	460
Список литературы	461

Глава 25. Термоэлектрические явления

25.1. Эффект Зеебека	461
25.2. Эффект Пельтье	465
25.3. Эффект Томсона	466
Список литературы	467

Глава 26. Гальваномагнитные и термомагнитные явления

26.1. Введение	467
26.2. Коэффициенты Холла для металлов и сплавов	470
26.3. Гальваномагнитные явления в мышьяке, висмуте, сурьме и их сплавах	475
26.4. Гальвано- и термомагнитные явления в ферромагнетиках	478
26.5. Влияние магнитного поля на сопротивление металлов при различных температурах	496
Список литературы	505

Глава 27. Магнитные свойства диа- и парамагнетиков

Список литературы	520
-------------------	-----

Глава 28. Магнитные свойства ферромагнетиков

28.1. Введение	523
28.2. Основные физические характеристики ферромагнетиков	523
Намагниченность насыщения и точка Кюри	523
Намагниченность ферромагнетиков как функция напряженности магнитного поля и температуры	526
Магнитная анизотропия	531
Магнитострикция	534
Коэффициент размагничивания	545
28.3. Ферромагнетики, имеющие важное значение в технике	546
Магнитомягкие материалы	546
Магнитотвердые материалы	557
Список литературы	562

Глава 29. Ферриты

29.1. Ферриты-шпинели	562
Простые ферриты	564
Смешанные ферриты	566
29.2. Ферриты со структурой граната	568
Кристаллографические и другие характеристики	574
Магнитные свойства	577
29.3. Гексагональные ферриты	585
29.4. Некоторые ферро- и ферримагнитные диэлектрики	592
29.5. Марки и основные параметры некоторых ферритов, применяемых в СССР	595
Список литературы	597

Глава 30. Антиферромагнетики

30.1. Введение	600
30.2. Магнитные и магнитооптические свойства легкоосных антиферромагнетиков	600
30.3. Основные магнитные свойства легкоосных антиферромагнетиков	603
30.4. Метамагнетики	604
30.5. Антиферромагнетики с взаимодействием Дзялошинского	604
30.6. Пьезомагнетики и магнитоэлектрики	605
30.7. Органические антиферромагнетики	605
30.8. Некоторые свойства антиферромагнетиков	605
Список литературы	630

V. ОПТИКА И РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Глава 31. Оптические свойства веществ

31.1. Показатели преломления	634
Газы	634
Жидкости	635
Оптические стекла	635
Кварц	636
Кристаллы	637
Различные материалы	639
31.2. Коэффициенты отражения, просветление оптических изделий	639
31.3. Области прозрачности и коэффициенты поглощения	641
31.4. Излучение	643
Излучение абсолютно черного тела	643
Тепловое излучение тел	645
Яркость некоторых источников света	647
31.5. Светочувствительность фотографических материалов	647
Список литературы	647

Глава 32. Спектры элементов и некоторые параметры молекул

32.1. Классификация спектров атомов и молекул	648
32.2. Переход от длин волн, измеренных в воздухе, к длинам волн в вакууме	651
32.3. Вероятности радиационных переходов в атоме водорода	652
32.4. Спектры некоторых элементов и благородных газов	654
32.5. Стандарты длин волн	661
32.6. Параметры молекул	667
Дипольные моменты молекул	667
Электронные термы двухатомных молекул	663
Список литературы	672

Глава 33. Лазеры

33.1. Газовые лазеры на нейтральных атомах	673
33.2. Ионные лазеры	698
33.3. Молекулярные газовые лазеры	718
33.4. Лазеры на примесных кристаллах	738
33.5. Лазеры на основе стекол	752
33.6. Лазеры на полупроводниках	755
33.7. Жидкостные лазеры	757
Лазеры на хелатах редкоземельных элементов	757
Апротонные лазеры	758
33.8. Лазеры на химических красителях	759
Список литературы	761

Глава 34. Электро-, магнито- и пьезооптические эффекты

34.1. Линейный электрооптический эффект (эффект Поккельса)	761
34.2. Линейный магнитооптический эффект (эффект Фарадея)	767
34.3. Квадратичный электрооптический эффект (эффект Керра)	775
34.4. Пьезооптический эффект	775
34.5. Оптическая активность	778
34.6. Нелинейные оптические эффекты	779
Генерация второй гармоники в кристаллах	779
Показатели преломления нелинейных кристаллов	786
Вынужденное рассеяние света	794
Характерные сдвиги частот Ω при ВКР	794
Список литературы	796

Глава 35. Рентгеновское излучение

35.1. Основные определения и обозначения в спектроскопии рентгеновского излучения	796
35.2. Закон Мозли и правило спин-дублетов для диаграммных линий	797
35.3. Таблицы диаграммных линий и краев поглощения линий рентгеновского излучения для различных элементов.	797
K-серия	797
L-серия	799
M-серия	803
N-серия	804
35.4. Относительные интенсивности линий	805
35.5. Ширина и форма линий рентгеновского излучения	806
35.6. Поглощение рентгеновского излучения при прохождении через вещество	809
Список литературы	809

VI. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Глава 36. Элементарные частицы

36.1. Введение	810
36.2. Основные группы и характеристики элементарных частиц	810
36.3. Унитарная симметрия и соотношение между массами элементарных частиц	811
36.4. Символика элементарных частиц	811
36.5. Элементарные частицы, стабильные по отношению к сильным распадам	812
36.6. Мезоны и мезонные резонансы	818
36.7. Барионы и барионные резонансы	819
36.8. Магнитные моменты элементарных частиц	824
36.9. Параметры распадов элементарных частиц	824
Список литературы	824

Глава 37. Ядерные свойства нуклидов

37.1. Таблица изотопов	824
37.2. Эталонные энергии γ -квантов	866
37.3. Эталонные группы α -частиц	867
37.4. Квантовые характеристики ядер	867
37.5. Радиоактивные ряды	872
Список литературы	873

Глава 38. Мёссбауэровские ядра

38.1. Введение	874
38.2. Характеристики мёссбауэровских ядер	874
38.3. Параметры мёссбауэровских спектров	880
38.4. Изомерный сдвиг	883
Список литературы	883

Глава 39. Реакции под действием нейтронов

39.1. Основные характеристики нейтрона	883
39.2. Характеристики пороговых реакций. Энергии возбужденных состояний ядер	883
39.3. Реакции (n, γ)	884
39.4. Реакции (n, n')	886
39.5. Реакции ($n, 2n$)	887
39.6. Реакции с испусканием заряженных частиц	888
39.7. Характеристики пороговых детекторов нейтронов	889
Список литературы	891

Глава 40. Реакции, приводящие к образованию нейтронов

40.1. Энергия связи нейтронов	891
40.2. Реакции (γ, n)	891
40.3. Реакции (p, n)	893
40.4. Реакции (d, n)	899
40.5. Реакции (α, n)	901
40.6. Реперные точки, используемые для калибровки пучков ускорителей	903
Список литературы	903

Глава 41. Прохождение нейтронов через вещество

41.1. Сечения взаимодействия нейтронов с веществом для нейтронов тепловых энергий	904
41.2. Графики полных нейтронных сечений в интервале энергий $0,01-10^7$ эв	914
41.3. Резонансные интегралы захвата	923
41.4. Диффузионные постоянные веществ	924
Замедление нейтронов	924
Диффузия нейтронов	926
41.5. Когерентные явления при прохождении нейтронов через вещество	928
Список литературы	929

Глава 42. Деление ядер

42.1. Введение	929
42.2. Спонтанное деление	930
42.3. Сечения деления ядер	931
42.4. Нейтроны деления	931
42.5. Мгновенное γ -излучение, сопровождающее деление	935
42.6. Энергия, выделяемая при делении	936
42.7. Запаздывающие нейтроны	937
42.8. Продукты деления ядер	938
42.9. Фотоделение и деление ядер под действием заряженных частиц	939
Список литературы	942

Глава 43. Термоядерные реакции

43.1. Формула Гамова	942
43.2. Энергетические выходы термоядерных реакций	943

43.3. Звездные циклы	946
43.4. Эффективные сечения термоядерных реакций	947
Список литературы	950

Глава 44. Прохождение ионизирующего излучения через вещество

44.1. Основные обозначения и определения	952
44.2. Кинетические характеристики релятивистских частиц	952
44.3. Прохождение тяжелых заряженных частиц через вещество	952
Прохождение протонов через вещество	953
Пробег дейтронов, α -частиц и других тяжелых заряженных частиц	953
Прохождение осколков деления через вещество	955
44.4. Прохождение быстрых электронов через вещество	956
44.5. Прохождение γ -излучения через вещество	960
Прохождение узкого монохроматического пучка γ -квантов через вещество	961
Ослабление широких пучков γ -квантов	964
Защита от γ -излучения	964
44.6. Относительная биологическая эффективность и допустимые уровни различных видов излучения	965
Список литературы	966

Глава 45. Космическое излучение

45.1. Введение	966
45.2. Первичное космическое излучение	967
Состав	967
Энергетический спектр	968
45.3. Вторичное космическое излучение	968
Высотный ход интенсивности космического излучения	968
Геомагнитные явления	969
Электронно-фотонные каскадные ливни	971
Список литературы	972

VII. АСТРОНОМИЯ И ГЕОФИЗИКА

Глава 46. Астрономия и астрофизика

46.1. Некоторые астрономические постоянные	973
46.2. Солнце	973
Характеристики Солнца	973
Положение в Галактике	973
Солнце как звезда	973
Излучение	974
Радиоизлучение	974
Солнечные пятна	975
46.3. Планеты и спутники	975
Орбиты планет	975
Физические характеристики планет	975
Фотометрические характеристики планет	976
Температурные условия на поверхности планет	976
Атмосферы планет	976
Спутники планет	977

Система колец Сатурна	977
Луна	977
Малые планеты	978
Кометы	978
Метеоры	979
46.4. Звезды	979
Спектральная классификация звезд	979
Звездные величины	980
Диаграмма Рессела-Герцшпрунга	980
Ближайшие звезды	981
Самые яркие звезды	981
Переменные звезды	981
Пульсары	983
Белые карлики	983
Гиганты	984
46.5. Галактика и Вселенная	984
Галактика	984
Межзвездная среда	985
Поглощение света звезд, межзвездная пыль	986
Межзвездный газ	986
Излучение и поля в межзвездном пространстве	986
Внегалактические туманности (галактики)	986
Вселенная	987
46.6. Космическое радиоизлучение	987
Спектральный состав радиоизлучения различных участков неба	987
Некоторые галактические источники радиоизлучения	988
Внегалактические источники радиоизлучения	988
Квazarы	988
46.7. Космические полеты и искусственные спутники Земли	989
46.8. Космическая распространенность элементов	990
Список литературы	991

Глава 47. Геофизика

47.1. Общие характеристики Земли	991
Фигура Земли	991
Строение Земли	992
47.2. Литосфера	992
Состав	992
Гравиметрия	994
Сейсмология	995
Земной магнетизм	996
Геотермика	998
47.3. Гидросфера	998
Распределение запасов воды на поверхности Земли	998
Состав океанической и пресной воды	999
Плотность и электропроводность воды	999
Физические свойства морского льда	1000
Звук и свет в океане	1000
Тепловой баланс океана	1000
47.4. Атмосфера	1000
Строение атмосферы	1000
Стандартная атмосфера	1001
Радиационный баланс атмосферы	1003
Электрические явления в атмосфере	1004
Стратификация атмосферы в зависимости от системы ионизации	1005
Список литературы	1005

ОТ РЕДАКТОРА

Развитие физических наук в последние десятилетия характеризуется неудержимым увеличением потока информации. Эта информация нуждается в систематическом обобщении и концентрации. Таблицы физических величин естественным образом концентрируют ту часть потока информации, которая допускает числовое выражение.

По отдельным узким разделам физики изданы и продолжают издаваться специализированные справочники и таблицы. К таким изданиям обычно обращаются специалисты.

Предлагаемые таблицы предназначены для широкого круга читателей, которым нужно получить информацию из областей физики, лежащих вне их более или менее узкой специальности. Поэтому в предлагаемых таблицах читатель не найдет, например, подробных данных ни о спектрах элементов, ни о свойствах растворов и т. п. «Таблицы физических величин» не претендуют на конкуренцию с такими многотомными изданиями, как знаменитый справочник Landolt-Börnstein либо Technical Tables и др. Для повседневного пользования обычно требуется широко доступный справочник умеренного объема. Удовлетворению этой потребности и призваны служить предлагаемые читателю таблицы.

Составители понимают, что таблицы далеки от совершенства, и надеются, что читатели своими критическими замечаниями будут способствовать улучшению этой книги в последующих изданиях.

И. К. КИКОНИН

1. ОБЩИЙ РАЗДЕЛ

ГЛАВА 1

ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

1.1. МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ (СИ)

В октябре 1960 г. XI Генеральная конференция по мерам и весам приняла Международную систему единиц, обозначаемую символом СИ (SI). Эта система утверждена в СССР как Государственный стандарт (ГОСТ 9867—61 «Международная система единиц») и должна предпочтительно применяться во всех областях науки, техники и народного хозяйства.

Международная система единиц измерений физических величин — единая универсальная система. Она связывает единицы измерения механических, тепловых, электрических, магнитных и других величин. В состав системы входят шесть основных единиц (метр, килограмм, секунда, ампер, градус Кельвина, свеча), две дополнительные (радиан и стерадиан) и 27 важнейших производных единиц из различных областей науки (табл. 1.1). В государственных стандартах СССР применяется понятие размера единицы, являющегося количественной мерой физической величины, содержащейся в единице измерения. Размер производных единиц определяется законами, связывающими физические величины, и выражен через размер основных или других производных единиц. Например, единица силы ньютон (N) установлена на основе второго закона Ньютона: она равна силе, которая сообщает ускорение 1 м/сек^2 массе 1 кг . При выборе размера соблюдается в основном условие когерентности (связности) системы: в уравнениях, определяющих единицы измерения производных величин, коэффициент пропорциональности должен быть величиной безразмерной и равен единице.

В Международной системе единиц четко разграничены единицы массы (килограмм) и силы (ньютон). Для измерения механической, тепловой и электрической энергий установлена одна универсальная единица — джоуль.

Государственный стандарт допускает применение других систем единиц, когда это удобно и необходимо, но преимущественно должна применяться система единиц СИ.

В настоящее время вводится новый стандарт единиц физических величин. Изменения наименований физических величин и их новые обозначения приведены в примечании.

Определение основных единиц системы СИ

Метр — длина, равная $1650763,73$ длины волн излучения в вакууме, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома ^{86}Kr .

Килограмм — единица массы — представлен массой международного прототипа килограмма.

Секунда — $1/31556925,9747$ часть тропического года для 1900 г. января 0 в 12 ч эфемеридного времени.

Ампер — сила неизменяющегося тока, который проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызывает между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ единиц силы Международной системы на каждый метр длины.

Градус Кельвина — единица измерения температуры по термодинамической температурной шкале, в которой для температуры тройной точки воды установлено значение $273,16^\circ \text{K}$ (точно).

Свеча — единица силы света, значение которой принимается таким, чтобы яркость полого излучателя при температуре затвердевания платины была равна 60 св/см^2 .

Международная система единиц (СИ)

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение		Размер единицы
		русскими буквами	латинскими буквами	
Основные единицы				
Длина	метр	м	m	
Масса	килограмм	кг	kg	
Время	секунда	сек	s	
Сила электрического тока	ампер	а	A	
Термодинамическая температура	градус Кельвина	°К	°K	
Сила света	свеча	св	cd	
Дополнительные единицы				
Плоский угол	радиан	рад	rad	
Телесный угол	стерадиан	стер	sr	
Производные единицы				
Площадь	квадратный метр	м²	m²	(1 м)²
Объем	кубический метр	м³	m³	(1 м)³
Частота	герц	Гц	Hz	1:(1 сек)
Плотность (объемная масса)	килограмм на кубический метр	кг/м³	kg/m³	(1 кг):(1 м)³
Линейная скорость	метр в секунду	м/сек	m/s	(1 м):(1 сек)
Угловая скорость	радиан в секунду	рад/сек	rad/s	(1 рад):(1 сек)
Линейное ускорение	метр на секунду в квадрате	м/сек²	m/s²	(1 м):(1 сек)²
Угловое ускорение	радиан на секунду в квадрате	рад/сек²	rad/s²	(1 рад):(1 сек)²
Сила	ньютон	н	N	(1 кг)·(1 м):(1 сек)
Давление (механическое напряжение)	ньютон на квадратный метр	н/м²	N/m²	(1 н):(1 м)²
Динамическая вязкость	ньютон-секунда на квадратный метр	н·сек/м²	N·s/m²	(1 н)·(1 сек):(1 м)²
Кинематическая вязкость	квадратный метр на секунду	м²/сек	m²/s	(1 м)²:(1 сек)
Работа, энергия, количество теплоты	джоуль	дж	J	(1 н)·(1 м)
Мощность	ватт	вт	W	(1 дж):(1 сек)
Количество электричества, электрический заряд	кулон	к	C	(1 а)·(1 сек)
Электрическое напряжение, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила	вольт	в	V	(1 вт):(1 а)
Напряженность электрического поля	вольт на метр	в/м	V/m	(1 в):(1 м)
Электрическое сопротивление	ом	ом	Ω	(1 в):(1 а)
Электрическая емкость	фарада	ф	F	(1 к):(1 в)
Магнитный поток	вебер	вб	Wb	(1 к)·(1 м)
Индуктивность	генри	гн	H	(1 вб):(1 а)
Магнитная индукция	тесла	тл	T	(1 вб):(1 м)²
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	а/м	A/m	(1 а):(1 м)
Магнитодвижущая сила	ампер	а	A	(1 а)
Световой поток	люмен	лм	lm	(1 св)·(1 стер)
Яркость	свеча на квадратный метр или нит	св/м² или нит	cd/m², nt	(1 св):(1 м)²
Освещенность	люкс	лк	lx	(1 лм):(1 м)²

Таблица 1.2

Приставки для образования кратных и дольных единиц измерения

Приставка	Числовое значение	Сокращенное обозначение		Приставка	Числовое значение	Сокращенное обозначение	
		русскими буквами	латинскими или греческими буквами			русскими буквами	латинскими буквами
Пико	10^{-12}	<i>п</i>	<i>p</i>	Дека	10	<i>да</i>	<i>da</i>
Нано	10^{-9}	<i>н</i>	<i>n</i>	Гекто	10^2	<i>г</i>	<i>h</i>
Микро	10^{-6}	<i>мк</i>	μ	Кило	10^3	<i>к</i>	<i>k</i>
Милли	10^{-3}	<i>м</i>	<i>m</i>	Мега	10^6	<i>М</i>	<i>M</i>
Сантн	10^{-2}	<i>с</i>	<i>c</i>	Гига	10^9	<i>Г</i>	<i>G</i>
Деци	10^{-1}	<i>д</i>	<i>d</i>	Тера	10^{12}	<i>Т</i>	<i>T</i>

Единицы измерения механических величин

Наименование	Обозначение, формула определения		МКС			СГС			МКГСС		
	МКС, СГС	МКГСС	Сокращенное обозначение		Размерность в системе МКС	Сокращенное обозначение		Размерность в системе СГС	Сокращенное обозначение		Размерность в системе МКГСС
			русскими буквами	латинскими буквами		русскими буквами	латинскими буквами		русскими буквами	латинскими буквами	
Длина	l, r		м	m	—	см	cm	—	м	m	—
Время	t		сек	s	—	сек	s	—	сек	s	—
Масса	m	$m = F/a$	кг	kg	—	г	g	—	кг·сек ² /м	kg·s ² /m	м ⁻¹ ·кг·сек ²
Сила	$F = ma$	F	н	N	м·кг·сек ⁻²	дин	dyn	см·г·сек ⁻²	кг	kG	—
Плоский угол	$\alpha = l/r$		рад	rad	—	рад	rad	—	рад	rad	—
Частота	$\nu = 1/t$		гц	Hz	сек ⁻¹	гц	Hz	сек ⁻¹	гц	Hz	сек ⁻¹
Угловая скорость	$\omega = a/t$		рад/сек	rad/s	сек ⁻¹	1/сек	1/s	сек ⁻¹	рад/сек	rad/s	сек ⁻¹
Угловое ускорение	$\varepsilon = \omega/t$		рад/сек ²	rad/s ²	сек ⁻²	1/сек ²	1/s ²	сек ⁻²	рад/сек ²	rad/s ²	сек ⁻²
Скорость	$v = l/t$		м/сек	m/s	м·сек ⁻¹	см/сек	cm/s	см·сек ⁻¹	м/сек	m/s	м·сек ⁻¹
Ускорение	$a = \Delta v / \Delta t$		м/сек ²	m/s ²	м·сек ⁻²	см/сек ²	cm/s ²	см·сек ⁻²	м/сек ²	m/s ²	м·сек ⁻²
Площадь	$S = l^2$		м ²	m ²	м ²	см ²	cm ²	см ²	м ²	m ²	м ²
Объем	$V = l^3$		м ³	m ³	м ³	см ³	cm ³	см ³	м ³	m ³	м ³
Плотность	$\rho = m/V$		кг/м ³	kg/m ³	м ⁻³ ·кг	г/см ³	g/cm ³	см ⁻³ ·г	кг·сек ² /м ⁴	kg·s ² /m ⁴	м ⁻⁴ ·кг·сек ²
Удельный вес*	$\gamma = mg/V$		н/м ³	N/m ³	м ⁻² ·кг·сек ⁻²	дин/см ³	dyn/cm ³	см ⁻² ·г·сек ⁻²	кг/м ³	kg/m ³	м ⁻³ ·кг
Момент инерции	$J = mr^2$		кг·м ²	kg·m ²	м ² ·кг	г·см ²	g·cm ²	см ² ·г	кг·м·сек ²	kg·m·s ²	м·кг·сек ²
Количество движения	$i = mv$		кг·м/сек	kg·m/s	м·кг·сек ⁻¹	г·см/сек	g·cm/s	см·г·сек ⁻¹	кг·сек	kg·s	кг·сек
Момент силы	$M = Fl$		н·м	N·m	м ² ·кг·сек ⁻²	дин·см	dyn·cm	см ² ·г·сек ⁻²	кг·м	kg·m	м·кг
Работа, энергия	$A = Fl \cos \alpha$		дж	J	м ² ·кг·сек ⁻²	эрг	erg	см ² ·г·сек ⁻²	кг·м	kg·m	м·кг
Мощность	$W = A/t$		вт	W	м ² ·кг·сек ⁻³	эрг/сек	erg/s	см ² ·г·сек ⁻³	кг·м/сек	kg·m/s	м·кг·сек ⁻¹
Давление	$P = F/S$		н/м ²	N/m ²	м ⁻¹ ·кг·сек ⁻²	дин/см ²	dyn/cm ²	см ⁻¹ ·г·сек ⁻²	кг/м ²	kg/m ²	м ⁻² ·кг
Динамическая вязкость	$\eta = (F/S) \times (\Delta l / \Delta v)$		н·сек/м ²	N·s/m ²	м ⁻¹ ·кг·сек ⁻¹	пуаз	P	см ⁻¹ ·г·сек ⁻¹	кг·сек/м ²	kg·s/m ²	м ⁻² ·кг·сек
Кинематическая вязкость	$\zeta = \eta/\rho$		м ² /сек	m ² /s	м ² ·сек ⁻¹	ст	st	см ² ·сек ⁻¹	м ² /сек	m ² /s	м ² ·сек ⁻¹

* g — ускорение свободного падения.

1.2 ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Государственный стандарт допускает для измерения механических величин три системы единиц:

- 1) система СИ (МКС), основные единицы которой метр, килограмм, секунда;
- 2) система СГС, основные единицы которой сантиметр, грамм, секунда;
- 3) система МКГСС, основные единицы которой метр, килограмм-сила; секунда.

Преимущественно должна применяться система МКС. Вместе с тем допускается применение внесистемных единиц: длины — микрон; массы — тонна и центнер; времени — час и минута; плоского угла — градус, минута и секунда; площади — ар и гектар; объе-

ма — литр; угла поворота — оборот; угловая скорость — оборот в минуту и оборот в секунду; давление — бар и техническая атмосфера и т. д.

В табл. 1.3 приведены наименования основных механических величин, их обозначения, формулы, с помощью которых определяют эти величины, единицы измерения и размерности* в системах МКС, СГС и МКГСС.

* Размерность устанавливает соотношение данной производной единицы с основными единицами системы на основании определяющих уравнений. Формулы размерности имеют важное значение при проверке правильности математических уравнений, выражающих функциональные зависимости между числовыми значениями физических величин.

Таблица 1.4

Соотношение между единицами длины

Единица измерения	Сокращенное обозначение	X-единица	Ангстрем	Нанометр	Микрометр	Миллиметр	Сантиметр	Дюйм
X-единица	X	1	$1,00206 \cdot 10^{-3}$	$1,00206 \cdot 10^{-1}$	$1,00206 \cdot 10^{-7}$	$1,00206 \cdot 10^{-10}$	$1,00206 \cdot 10^{-11}$	$3,945 \cdot 10^{-12}$
Ангстрем	Å	$0,9979 \cdot 10^3$	1	10^{-1}	10^{-4}	10^{-7}	10^{-8}	$3,937 \cdot 10^{-9}$
Нанометр	нм	$0,9979 \cdot 10^4$	10	1	10^{-3}	10^{-6}	10^{-7}	$3,937 \cdot 10^{-8}$
(миллимикрон)								
Микрометр	мкм	$0,9979 \cdot 10^7$	10^4	10^3	1	10^{-3}	10^{-4}	$3,937 \cdot 10^{-5}$
(микрон)								
Миллиметр	мм	$0,9979 \cdot 10^{10}$	10^7	10^6	10^3	1	10^{-1}	$3,937 \cdot 10^{-2}$
Сантиметр	см	$0,9979 \cdot 10^{11}$	10^8	10^7	10^4	10	1	0,3937
Дюйм	дюйм	$0,2535 \cdot 10^{12}$	$2,540 \cdot 10^8$	$2,540 \cdot 10^7$	$2,540 \cdot 10^4$	25,40	2,540	1
Фут	фут	$0,3042 \cdot 10^{13}$	$3,048 \cdot 10^9$	$3,048 \cdot 10^8$	$3,048 \cdot 10^5$	$3,048 \cdot 10^2$	30,48	12
Метр	м	$0,9979 \cdot 10^{13}$	10^{10}	10^9	10^6	10^3	10^2	39,37
Ярд	ярд	$0,9125 \cdot 10^{13}$	$9,1440 \cdot 10^9$	$9,1440 \cdot 10^8$	$9,1440 \cdot 10^5$	$9,1440 \cdot 10^2$	91,44	36
Километр	км	$0,9979 \cdot 10^{16}$	10^{13}	10^{12}	10^9	10^6	10^5	$3,937 \cdot 10^4$
Сухопутная миля	—	$1,6060 \cdot 10^{16}$	$1,6093 \cdot 10^{13}$	$1,6093 \cdot 10^{12}$	$1,6093 \cdot 10^9$	$1,6093 \cdot 10^6$	$1,6093 \cdot 10^5$	$6,336 \cdot 10^4$
Морская миля	—	$1,8492 \cdot 10^{16}$	$1,853 \cdot 10^{13}$	$1,853 \cdot 10^{12}$	$1,853 \cdot 10^9$	$1,853 \cdot 10^6$	$1,853 \cdot 10^5$	$7,295 \cdot 10^4$
Световой год	—	$9,441 \cdot 10^{28}$	$9,46 \cdot 10^{25}$	$9,46 \cdot 10^{24}$	$9,46 \cdot 10^{21}$	$9,46 \cdot 10^{18}$	$9,46 \cdot 10^{17}$	$3,724 \cdot 10^{17}$

Продолжение табл. 1.4

Единица измерения	Фут	Метр	Ярд	Километр	Сухопутная миля	Морская миля	Световой год
X-единица	$3,2876 \cdot 10^{-13}$	$1,00206 \cdot 10^{-13}$	$1,0959 \cdot 10^{-13}$	$1,00206 \cdot 10^{-16}$	$3,2267 \cdot 10^{-17}$	$5,41 \cdot 10^{-17}$	$1,06 \cdot 10^{-29}$
Ангстрем	$3,2808 \cdot 10^{-10}$	10^{-10}	$1,0936 \cdot 10^{-10}$	10^{-13}	$6,214 \cdot 10^{-14}$	$5,40 \cdot 10^{-14}$	$1,06 \cdot 10^{-25}$
Нанометр	$3,2808 \cdot 10^{-9}$	10^{-9}	$1,0936 \cdot 10^{-9}$	10^{-12}	$6,214 \cdot 10^{-13}$	$5,40 \cdot 10^{-13}$	$1,06 \cdot 10^{-25}$
(миллимикрон)							
Микрометр	$2,2808 \cdot 10^{-6}$	10^{-6}	$1,0936 \cdot 10^{-6}$	10^{-9}	$6,214 \cdot 10^{-10}$	$5,40 \cdot 10^{-10}$	$1,06 \cdot 10^{-22}$
(микрон)							
Миллиметр	$3,2808 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	$1,0936 \cdot 10^{-3}$	10^{-6}	$6,214 \cdot 10^{-7}$	$5,40 \cdot 10^{-7}$	$1,06 \cdot 10^{-19}$
Сантиметр	$3,2808 \cdot 10^{-2}$	10^{-2}	$1,0936 \cdot 10^{-2}$	10^{-5}	$6,214 \cdot 10^{-6}$	$5,40 \cdot 10^{-6}$	$1,06 \cdot 10^{-18}$
Дюйм	$8,3333 \cdot 10^{-2}$	$2,540 \cdot 10^{-2}$	$2,7777 \cdot 10^{-2}$	$2,5401 \cdot 10^{-5}$	$1,5787 \cdot 10^{-5}$	$1,37 \cdot 10^{-5}$	$2,68 \cdot 10^{-18}$
Фут	1	0,3048	0,3333	$3,048 \cdot 10^{-4}$	$1,8939 \cdot 10^{-4}$	$1,64 \cdot 10^{-4}$	$3,22 \cdot 10^{-17}$
Метр	3,2808	1	1,0936	10^{-3}	$6,2138 \cdot 10^{-4}$	$5,40 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-16}$
Ярд	3	0,91440	1	$9,1440 \cdot 10^{-4}$	$5,6818 \cdot 10^{-4}$	$4,93 \cdot 10^{-4}$	$9,7 \cdot 10^{-17}$
Километр	$3,2808 \cdot 10^3$	10^3	$1,0936 \cdot 10^3$	1	0,62138	0,540	$1,06 \cdot 10^{-13}$
Сухопутная миля	$5,280 \cdot 10^3$	$1,6093 \cdot 10^3$	$1,760 \cdot 10^3$	1,6093	1	0,86835	$1,7 \cdot 10^{-13}$
Морская миля	$6,080 \cdot 10^3$	$1,853 \cdot 10^3$	$2,0265 \cdot 10^3$	1,853	1,1516	1	$1,93 \cdot 10^{-13}$
Световой год	$3,1033 \cdot 10^{26}$	$9,46 \cdot 10^{25}$	$1,035 \cdot 10^{26}$	$9,460 \cdot 10^{25}$	$5,878 \cdot 10^{25}$	$5,104 \cdot 10^{25}$	1

Соотношение между единицами площади

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Барн	Квадратный микрометр	Квадратный миллиметр	Квадратный сантиметр	Квадратный дюйм	Квадратный фут	Квадратный ярд	Квадратный метр	Ар	Гектар
Барн	<i>барн</i>	1	10^{-16}	10^{-22}	10^{-24}	$1,55 \cdot 10^{-25}$	$1,0763 \cdot 10^{-27}$	$1,1960 \cdot 10^{-28}$	10^{-28}	10^{-30}	10^{-32}
Квадратный микрометр	<i>мкм²</i>	10^{16}	1	10^{-6}	10^{-8}	$1,550 \cdot 10^{-9}$	$1,0763 \cdot 10^{-12}$	$1,1960 \cdot 10^{-12}$	10^{-12}	10^{-14}	10^{-16}
Квадратный миллиметр	<i>мм²</i>	10^{22}	10^6	1	10^{-2}	$1,550 \cdot 10^{-3}$	$1,0763 \cdot 10^{-5}$	$1,1960 \cdot 10^{-6}$	10^{-6}	10^{-8}	10^{-10}
Квадратный сантиметр	<i>см²</i>	10^{24}	10^8	10^2	1	0,1550	$1,0763 \cdot 10^{-3}$	$1,1960 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	10^{-6}	10^{-8}
Квадратный дюйм	<i>дюйм²</i>	$6,4516 \cdot 10^{24}$	$6,4516 \cdot 10^8$	$6,4516 \cdot 10^2$	6,4516	1	$6,9444 \cdot 10^{-3}$	$7,7216 \cdot 10^{-4}$	$6,4516 \cdot 10^{-4}$	$6,4516 \cdot 10^{-6}$	$6,4516 \cdot 10^{-8}$
Квадратный фут	<i>фут²</i>	$9,29030 \cdot 10^{26}$	$9,29030 \cdot 10^{10}$	$9,29030 \cdot 10^4$	$9,29030 \cdot 10^2$	$1,44 \cdot 10^2$	1	0,111	$9,29030 \cdot 10^{-2}$	$9,29030 \cdot 10^{-4}$	$9,29030 \cdot 10^{-6}$
Квадратный ярд	<i>ярд²</i>	$8,36137 \cdot 10^{27}$	$8,3613 \cdot 10^{11}$	$8,3613 \cdot 10^5$	$8,3613 \cdot 10^3$	$1,30 \cdot 10^3$	9	1	0,83613	$8,3613 \cdot 10^{-3}$	$8,3613 \cdot 10^{-5}$
Квадратный метр	<i>м²</i>	10^{28}	10^{12}	10^6	10^4	$1,550 \cdot 10^3$	10,764	1,1960	1	10^{-2}	10^{-4}
Ар	<i>а</i>	10^{80}	10^{14}	10^8	10^6	$1,550 \cdot 10^5$	$1,0764 \cdot 10^3$	$1,1960 \cdot 10^2$	10^2	1	10^{-2}
Гектар	<i>га</i>	10^{32}	10^{16}	10^{10}	10^8	$1,550 \cdot 10^7$	$1,0764 \cdot 10^5$	$1,1960 \cdot 10^4$	10^4	10^2	1

Таблица 1.6

Соотношение между единицами объема

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Кубический микрометр	Кубический миллиметр	Кубический сантиметр	Кубический дюйм	Литр	Кубический фут	Кубический ярд	Кубический метр
Кубический микрометр	<i>мкм³</i>	1	10^{-9}	10^{-12}	$6,1023 \cdot 10^{-14}$	10^{-15}	$3,5314 \cdot 10^{-17}$	$1,3079 \cdot 10^{-18}$	10^{-18}
Кубический миллиметр	<i>мм³</i>	10^9	1	10^{-3}	$6,1023 \cdot 10^{-5}$	10^{-6}	$3,5314 \cdot 10^{-8}$	$1,3079 \cdot 10^{-9}$	10^{-9}
Кубический сантиметр	<i>см³</i>	10^{12}	10^3	1	$6,1023 \cdot 10^{-2}$	10^{-3}	$3,5314 \cdot 10^{-5}$	$1,3079 \cdot 10^{-6}$	10^{-6}
Кубический дюйм	<i>дюйм³</i>	$1,63871 \cdot 10^{13}$	$1,63871 \cdot 10^4$	16,3871	1	$1,63871 \cdot 10^{-2}$	$5,787 \cdot 10^{-4}$	$2,1432 \cdot 10^{-5}$	$1,63871 \cdot 10^{-5}$
Литр	<i>л</i>	10^{15}	10^6	10^3	61,023	1	$3,5314 \cdot 10^{-2}$	$1,3079 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}
Кубический фут	<i>фут³</i>	$2,8317 \cdot 10^{16}$	$2,8317 \cdot 10^7$	$2,8317 \cdot 10^4$	$1,7279 \cdot 10^3$	28,3168	1	$3,7037 \cdot 10^{-2}$	$2,83168 \cdot 10^{-2}$
Кубический ярд	<i>ярд³</i>	$7,6455 \cdot 10^{17}$	$7,6455 \cdot 10^8$	$7,6455 \cdot 10^5$	$4,6653 \cdot 10^4$	$7,6455 \cdot 10^2$	27,0	1	0,76455
Кубический метр	<i>м³</i>	10^{18}	10^9	10^6	$6,1023 \cdot 10^4$	10^3	35,314	1,3079	1

Соотношение между единицами массы

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Гран	Микрограмм	Миллиграмм	Грамм	Килограмм	Английская унция	Унция (аптекарская)	Английский фунт
Гран	—	1	$6,48 \cdot 10^4$	$6,48 \cdot 10^1$	$6,48 \cdot 10^{-2}$	$6,47989 \cdot 10^{-5}$	$2,2857 \cdot 10^{-3}$	$2,0833 \cdot 10^{-3}$	$1,4285 \cdot 10^{-4}$
Микрограмм	мкг	$1,5432 \cdot 10^{-5}$	1	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	$3,5274 \cdot 10^{-8}$	$3,2150 \cdot 10^{-8}$	$2,2046 \cdot 10^{-9}$
Миллиграмм	мг	$1,5432 \cdot 10^{-2}$	10^3	1	10^{-2}	10^{-6}	$3,5274 \cdot 10^{-5}$	$3,2150 \cdot 10^{-5}$	$2,2046 \cdot 10^{-6}$
Грамм	г	15,432	10^6	10^3	1	10^{-3}	$3,5274 \cdot 10^{-2}$	$3,2150 \cdot 10^{-2}$	$2,2046 \cdot 10^{-3}$
Килограмм	кг	$1,5432 \cdot 10^4$	10^9	10^6	10^3	1	35,274	32,150	2,2046
Английская унция	—	$4,375 \cdot 10^2$	$2,8349 \cdot 10^7$	$2,8349 \cdot 10^4$	28,349	$2,8349 \cdot 10^{-2}$	1	0,91144	$6,25 \cdot 10^{-2}$
Английский фунт	—	$7,00 \cdot 10^3$	$4,5359 \cdot 10^8$	$4,5359 \cdot 10^5$	$4,5359 \cdot 10^2$	0,45359	16	14,58	1

Таблица 1.8

Соотношение между единицами плотности

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Грамм на кубический сантиметр	Грамм на кубический дюйм	Грамм на кубический фут	Унция на кубический сантиметр	Унция на кубический дюйм	Унция на кубический фут	Фунт на кубический сантиметр	Фунт на кубический дюйм	Фунт на кубический фут
Грамм на кубический сантиметр	г/см ³	1	16,4	$2,83 \cdot 10^4$	$3,53 \cdot 10^{-2}$	0,579	$1,00 \cdot 10^3$	$2,20 \cdot 10^{-3}$	$3,61 \cdot 10^{-2}$	62,428
Грамм на кубический дюйм	г/дюйм ³	$6,10 \cdot 10^{-2}$	1	$1,73 \cdot 10^3$	$2,15 \cdot 10^{-3}$	$3,53 \cdot 10^{-2}$	61,0	$1,34 \cdot 10^{-4}$	$2,20 \cdot 10^{-3}$	3,81
Грамм на кубический фут	г/фут ³	$3,53 \cdot 10^{-5}$	$5,79 \cdot 10^4$	1	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$2,04 \cdot 10^{-5}$	$3,53 \cdot 10^{-2}$	$7,79 \cdot 10^{-8}$	$1,28 \cdot 10^{-6}$	$2,20 \cdot 10^{-3}$
Унция на кубический сантиметр	унция/см ³	28,35	$4,65 \cdot 10^2$	$8,03 \cdot 10^5$	1	16,4	$2,83 \cdot 10^4$	$6,25 \cdot 10^{-2}$	1,024	$1,77 \cdot 10^3$
Унция на кубический дюйм	унция/дюйм ³	1,73	28,35	$4,90 \cdot 10^4$	$6,10 \cdot 10^{-2}$	1	$1,73 \cdot 10^3$	$3,82 \cdot 10^{-3}$	$6,25 \cdot 10^{-2}$	$1,08 \cdot 10^2$
Унция на кубический фут	унция/фут ³	$1,00 \cdot 10^{-3}$	$1,64 \cdot 10^{-2}$	28,35	$3,53 \cdot 10^{-5}$	$5,79 \cdot 10^{-4}$	1	$2,21 \cdot 10^{-6}$	$3,62 \cdot 10^{-5}$	$6,25 \cdot 10^{-2}$
Фунт на кубический сантиметр	фунт/см ³	$4,54 \cdot 10^2$	$7,43 \cdot 10^3$	$1,28 \cdot 10^7$	16	$2,62 \cdot 10^2$	$4,53 \cdot 10^5$	1	16,4	$2,83 \cdot 10^4$
Фунт на кубический дюйм	фунт/дюйм ³	27,680	$4,54 \cdot 10^2$	$7,84 \cdot 10^5$	0,976	16	$2,76 \cdot 10^4$	$6,10 \cdot 10^{-2}$	1	$1,73 \cdot 10^3$
Фунт на кубический фут	фунт/фут ³	$1,602 \cdot 10^{-2}$	0,262	$4,54 \cdot 10^2$	$5,65 \cdot 10^{-4}$	$9,26 \cdot 10^{-3}$	16	$3,53 \cdot 10^{-5}$	$5,79 \cdot 10^{-4}$	1

Таблица 1.9

Соотношение между единицами времени

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Секунда	Минута	Час	Сутки	Неделя	Год
Секунда	<i>сек</i>	1	$1,667 \cdot 10^{-2}$	$2,777 \cdot 10^{-4}$	$1,1574 \cdot 10^{-5}$	$1,6534 \cdot 10^{-6}$	$3,1688 \cdot 10^{-8}$
Минута	<i>мин</i>	60	1	$1,667 \cdot 10^{-2}$	$6,9444 \cdot 10^{-4}$	$9,9206 \cdot 10^{-5}$	$1,9013 \cdot 10^{-6}$
Час	<i>ч</i>	$3,6 \cdot 10^3$	60	1	$4,1667 \cdot 10^{-2}$	$5,952 \cdot 10^{-3}$	$1,1414 \cdot 10^{-4}$
Сутки	<i>сутки</i>	$8,640 \cdot 10^4$	$1,44 \cdot 10^3$	24	1	0,14285	$2,7378 \cdot 10^{-3}$
Неделя	—	$6,048 \cdot 10^5$	$1,0080 \cdot 10^4$	$1,68 \cdot 10^2$	7	1	$1,9165 \cdot 10^{-2}$
Год	<i>год</i>	$3,1557 \cdot 10^7$	$5,260 \cdot 10^5$	$8,7658 \cdot 10^3$	$3,6524 \cdot 10^2$	52,178	1

Таблица 1.10

Соотношение между единицами измерения угла

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Радян	Оборот	Градус	Минута	Секунда
Радян	<i>рад</i>	1	0,159	57,296	$3,438 \cdot 10^3$	$2,063 \cdot 10^5$
Оборот (окружность)	<i>об</i>	6,28	1	360	$2,160 \cdot 10^4$	$1,296 \cdot 10^6$
Градус	<i>°</i>	$1,7453 \cdot 10^{-2}$	$2,78 \cdot 10^{-3}$	1	60	$3,6 \cdot 10^3$
Минута	<i>'</i>	$2,9089 \cdot 10^{-4}$	$4,633 \cdot 10^{-5}$	$1,666 \cdot 10^{-2}$	1	60
Секунда	<i>"</i>	$4,848 \cdot 10^{-6}$	$7,716 \cdot 10^{-7}$	$2,778 \cdot 10^{-4}$	$1,6666 \cdot 10^{-2}$	1

Таблица 1.11

Соотношение между единицами скорости

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Сантиметр в секунду	Метр в секунду	Километр в час	Узел
Сантиметр в секунду	<i>см/сек</i>	1	10^{-2}	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$1,9425 \cdot 10^{-2}$
Метр в секунду	<i>м/сек</i>	10^2	1	3,6	1,9425
Километр в час	<i>км/ч</i>	27,778	0,27778	1	0,53959
Узел	<i>узел</i>	51,479	0,5148	1,8532	1

Таблица 1.12

Соотношение между единицами силы

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Дина	Ньютон	Стен	Килограмм-сила
Дина	<i>дин</i>	1	10^{-5}	10^{-8}	$1,0197 \cdot 10^{-6}$
Ньютон	<i>н</i>	10^5	1	10^{-3}	0,10197
Стен	<i>сн</i>	10^8	10^3	1	101,97
Килограмм-сила	<i>кг</i>	$9,8066 \cdot 10^5$	9,8066	$9,8066 \cdot 10^{-3}$	1

Соотношение между единицами давления

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Ньютона на квадратный метр	Дина на квадратный сантиметр	Килограмм-сила на квадратный метр	Бар	Гьеза	Атмосфера физическая	Атмосфера техническая	Миллиметр ртутного столба
Ньютон на квадратный метр (паскаль)	н/м^2	1	10	0,10197	10^{-5}	10^{-3}	$9,8692 \cdot 10^{-6}$	$1,0197 \cdot 10^{-5}$	$7,50 \cdot 10^{-3}$
Дина на квадратный сантиметр (мкбар)	дин/см^2	0,1	1	$1,0197 \cdot 10^{-2}$	10^{-6}	10^{-4}	$9,8692 \cdot 10^{-7}$	$1,0197 \cdot 10^{-6}$	$7,50 \cdot 10^{-4}$
Килограмм-сила на квадратный метр (мм вод. ст.)	кг/м^2	9,8066	98,066	1	$9,8066 \cdot 10^{-5}$	$9,8066 \cdot 10^{-3}$	$9,6784 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	$7,356 \cdot 10^{-2}$
Бар (гектогьеза)	бар	10^5	10^6	$1,0197 \cdot 10^4$	1	10^2	0,98692	1,0197	$7,50 \cdot 10^2$
Гьеза	гз	10^3	10^4	$1,0197 \cdot 10^2$	10^{-2}	1	$9,8692 \cdot 10^{-3}$	$1,0197 \cdot 10^{-2}$	7,50
Атмосфера физическая	атм	$1,0133 \cdot 10^5$	$1,0133 \cdot 10^6$	$1,0333 \cdot 10^4$	1,0133	$1,0133 \cdot 10^2$	1	1,0333	$7,6 \cdot 10^2$
Атмосфера техническая (килограмм на квадратный сантиметр)	$\text{ат (кг/см}^2\text{)}$	$9,8066 \cdot 10^4$	$9,8066 \cdot 10^5$	10^4	0,93066	93,066	0,96784	1	$7,356 \cdot 10^2$
Миллиметр ртутного столба (торр)	мм рт. ст.	$1,3332 \cdot 10^2$	$1,3332 \cdot 10^3$	13,595	$1,3332 \cdot 10^{-2}$	0,13332	$1,3157 \cdot 10^{-3}$	$1,359 \cdot 10^{-3}$	1

Таблица 1.14

Соотношение между единицами работы и энергии

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Эрг	Джоуль	Килограммометр	Ватт-час	Калория	Литр-атмосфера	Электрон вольт
Эрг	эрг	1	10^{-7}	$1,0197 \cdot 10^{-8}$	$2,7778 \cdot 10^{-11}$	$2,3884 \cdot 10^{-8}$	$9,8689 \cdot 10^{-10}$	$6,2419 \cdot 10^{11}$
Джоуль (ватт-секунда)	дж (вт.сек)	10^7	1	0,10197	$2,7778 \cdot 10^{-4}$	0,23889	$9,8689 \cdot 10^{-3}$	$6,2419 \cdot 10^{18}$
Килограммометр	кгм	$9,8066 \cdot 10^7$	9,8066	1	$2,724 \cdot 10^{-3}$	2,3427	$9,6781 \cdot 10^{-2}$	$6,1205 \cdot 10^{19}$
Ватт-час	вт.ч	$3,60 \cdot 10^{10}$	$3,60 \cdot 10^3$	$3,6709 \cdot 10^2$	1	$8,6001 \cdot 10^2$	35,527	$2,25 \cdot 10^{22}$
Калория	кал	$4,1868 \cdot 10^7$	4,1868	0,42685	$1,1628 \cdot 10^{-3}$	1	$4,1311 \cdot 10^{-2}$	$2,6126 \cdot 10^{19}$
Литр-атмосфера	л.атм	$1,0133 \cdot 10^9$	$1,0133 \cdot 10^{-2}$	$1,0333 \cdot 10$	$2,815 \cdot 10^{-2}$	24,206	1	$6,325 \cdot 10^{20}$
Электрон вольт	эв	$1,6021 \cdot 10^{-12}$	$1,6021 \cdot 10^{-19}$	$1,634 \cdot 10^{-20}$	$4,450 \cdot 10^{-23}$	$3,8276 \cdot 10^{-20}$	$1,5813 \cdot 10^{-21}$	1

Таблица 1.15

Соотношение между единицами мощности

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Эрг в секунду	Ватт	Килограммометр в секунду	Лошадиная сила	Лошадиная сила (английская)	Калория в секунду
Эрг в секунду	эрг/сек	1	10^{-7}	$1,0197 \cdot 10^{-8}$	$1,3596 \cdot 10^{-10}$	$1,3410 \cdot 10^{-10}$	$2,3884 \cdot 10^{-8}$
Ватт (джоуль в секунду)	вт (дж/сек)	10^7	1	0,10197	$1,3596 \cdot 10^{-3}$	$1,3410 \cdot 10^{-3}$	$2,3884 \cdot 10^{-1}$
Килограммометр в секунду	кгм/сек	$9,8066 \cdot 10^7$	9,8066	1	$1,3333 \cdot 10^{-2}$	$1,3151 \cdot 10^{-2}$	2,3427
Лошадиная сила	л. с.	$7,355 \cdot 10^8$	$7,355 \cdot 10^2$	75	1	0,9363	175,67
Лошадиная сила (английская)	л. с.	$7,457 \cdot 10^8$	$7,457 \cdot 10^2$	76	1,0139	1	178,11
Калория в секунду	кал/сек	$4,1868 \cdot 10^7$	4,1868	0,42693	$5,6924 \cdot 10^{-3}$	$5,6145 \cdot 10^{-3}$	1

1.3. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ВЕЛИЧИН

Государственный стандарт ГОСТ 8550—61 «Тепловые единицы» устанавливает систему; основными единицами которой являются: метр (м), килограмм (кг),

секунда (сек), градус Кельвина (°К) (по абсолютной термодинамической шкале). Стандарт допускает применение внесистемных единиц, основанных на калории в качестве единицы количества теплоты (табл. 1.16). Согласно ГОСТ 8550—61 $1 \text{ кал} = 4,1868 \text{ дж}$.

Таблица 1.16

Тепловые единицы

Наименование величины	Тепловые единицы системы (СИ) метр — килограмм — секунда — градус			Тепловые единицы, основанные на калории		
	Обозначение единиц измерения		Размерность	Обозначение единиц измерения		Множитель перевода в единицы СИ
	русскими буквами	латинскими буквами		русскими буквами	латинскими буквами	
Количество теплоты, термодинамический потенциал	дж	J	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{сек}^{-2}$	кал	cal	4,1868
Теплоемкость системы, энтропия системы	дж/град	J/deg	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{сек}^{-2} \times \times \text{град}^{-1}$	кал/град	cal/deg	4,1868
Удельная теплоемкость, удельная энтропия	дж/(кг $\times$ град)	J/(kg · deg)	$\text{м}^2 \cdot \text{сек}^{-2} \cdot \text{град}^{-1}$	кал/(г · град)	cal/(g · deg)	$4,1868 \cdot 10^3$
Удельный термодинамический потенциал, удельная теплота фазового превращения, удельная теплота химической реакции	дж/кг	J/kg	$\text{м}^2 \cdot \text{сек}^{-2}$	кал/г	cal/g	$4,1868 \cdot 10^3$
Температурный градиент	град/м	deg/m	$\text{м}^{-1} \cdot \text{град}$	—	—	—
Тепловой поток	вт	W	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{сек}^{-3}$	кал/сек	cal/s	4,1868
Поверхностная плотность теплового потока	вт/м ²	W/m ²	$\text{кг} \cdot \text{сек}^{-3}$	кал/(см ² · сек)	cal/(cm ² · s)	$4,1868 \cdot 10^4$
Коэффициент теплопередачи	вт/(м ² $\times$ град)	W/(m ² · deg)	$\text{кг} \cdot \text{сек}^{-3} \cdot \text{град}^{-1}$	кал/(см ² $\times$ сек · град)	cal/(cm ² · s · deg)	$4,1868 \cdot 10^4$
Коэффициент теплопроводности	вт/(м $\times$ град)	W/(m · deg)	$\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{сек}^{-3} \times \times \text{град}^{-1}$	кал/(см $\times$ сек · град)	cal/(cm · s · deg)	$4,1868 \cdot 10^2$
Коэффициент температуропроводности	м ² /сек	m ² /s	$\text{м}^2 \cdot \text{сек}^{-1}$	м ² /ч	m ² /h	$2,7778 \cdot 10^{-4}$

Температурные шкалы

В настоящее время существует четыре температурных шкалы, установленные международными рекомендациями (табл. 1.17).

Абсолютная термодинамическая шкала, в соответствии с решением X Генеральной конференции по мерам и весам 1954 г., определяется при помощи тройной точки воды в качестве основной реперной точки. Этой точке соответствует температура 273,16°К (точно). Нижней границей шкалы служит точка абсолютного

нуля температуры. Температура абсолютной термодинамической шкалы обозначается $T^{\circ}\text{К}$.

Стоградусная термодинамическая шкала имеет начало отсчета в точке, лежащей на 0,0100° ниже тройной точки воды (т. е. в точке плавления льда при нормальном давлении). Температура на этой шкале $t = (T - 273,15)^{\circ}\text{С}$. Интервал температуры по первой и второй шкалам имеет одно и то же значение.

Стоградусная международная шкала основана на определенном количестве постоянных и экспериментально воспроизводимых температур равновесия (реперных точек), которым присвоены определенные числовые значения (точки кипения кислорода, плавления льда, кипения серы, кипения воды, затвердевания серебра, затвердевания золота). Температура обозначается символом t и выражается в градусах стоградусной шкалы °С.

Абсолютная международная шкала построена по принципам международной шкалы температур, но с началом отсчета от абсолютного нуля. Температура по этой шкале выражается формулой $T = (t + 273,15)^{\circ}\text{К}$, где t — температура по стоградусной международной температурной шкале.

Из этих четырех температурных шкал ГОСТом утверждены две основные шкалы: первая (абсолютная термодинамическая шкала) и третья (стоградусная международная температурная шкала).

Таблица 1.17

Сравнение температурных шкал*

Шкала	Обозначение	Точка таяния льда	Точка кипения воды	Интервал
Цельсия	$t, ^{\circ}\text{С}$	0	100	100
Абсолютная	$T, ^{\circ}\text{К}$	273,16	373,16	100
Реомюра	t°, R	0	80	80
Фаренгейта	t°, F	32	212	180

* Формула пересчета

$$\frac{(T-273)^{\circ}\text{К}}{5} = \frac{t^{\circ}\text{С}}{5} = \frac{t^{\circ}\text{R}}{4} = \frac{(t-32)^{\circ}\text{F}}{9}$$

Электрические и магнитные единицы

Наименование величины	Формула определения в системе		Наименование и обозначение в системе		Размерность в системе			
	МКСА	СГС	МКСА	СГС и СГСМ	МКСА	СГСЭ	СГСМ	СГС
Количества электричества (кулон)	$q = It$ (t — время)	$q = r\sqrt{f}$ (f — сила) (r — расстояние)	кулон (к)	—	сек·а	см ^{3/2} ·с ^{1/2} ·сек ⁻¹	см ^{1/2} ·с ^{1/2}	см ^{3/2} ·с ^{1/2} ·сек ⁻¹
Поверхностная плотность зарядов	$\sigma = q/S$ (S — площадь)		кулон на квадратный метр (к/м ²)	—	м ⁻² ·сек·а	см ^{-1/2} ·с ^{1/2} ·сек ⁻¹	см ^{-3/2} ·с ^{1/2}	см ^{-1/2} ·с ^{1/2} ·сек ⁻¹
Напряженность электрического поля	$E = f/q$		вольт на метр (в/м)	—	м·кг·сек ⁻³ ·а ⁻¹	см ^{-1/2} ·с ^{1/2} ·сек ⁻¹	см ^{1/2} ·с ^{1/2} ·сек ⁻²	см ^{-1/2} ·с ^{1/2} ·сек ⁻¹
Разность электрических потенциалов	$U = A/q$ (A — работа)		вольт (в)	—	м ² ·кг·сек ⁻³ ·а ⁻¹	см ^{1/2} ·с ^{1/2} ·сек ⁻¹	см ^{3/2} ·с ^{1/2} ·сек ⁻²	см ^{1/2} ·с ^{1/2} ·сек ⁻¹
Электрическая емкость	$C = q/U$		фарада (ф)	сантиметр (см)	м ⁻² ·кг ⁻¹ ·сек ⁴ ·а ²	см	см ⁻¹ ·сек ²	см
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	$\epsilon_a = \epsilon_0 \cdot \epsilon$ (ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость)	$\epsilon_a = \epsilon$	фарада на метр (ф/м)	—	м ⁻³ ·кг ⁻¹ ·сек ⁴ ·а ²	ϵ_0	см ⁻² ·сек ²	—
Сила тока (ток)	—	$I = q/t$	ампер (а)	—	а	см ^{3/2} ·с ^{1/2} ·сек ⁻²	см ^{1/2} ·с ^{1/2} ·сек ⁻¹	см ^{3/2} ·с ^{1/2} ·сек ⁻²
Электрическое сопротивление	$R = U/I$		ом (ом)	—	м ² ·кг·сек ⁻³ ·а ⁻²	см ⁻¹ ·сек	см·сек ⁻¹	см ⁻¹ ·сек
Электрическое смещение (электрическая индукция)	$D = \epsilon_0 \epsilon E = \frac{q}{S}$	$D = \epsilon E$	кулон на квадратный метр (к/м ²)	—	м ⁻² ·сек·а	см ^{-1/2} ·с ^{1/2} ·сек ⁻¹	см ^{-3/2} ·с ^{1/2}	см ^{-1/2} ·с ^{1/2} ·сек ⁻¹
Диэлектрическая восприимчивость	$\xi = \epsilon_0(\epsilon - 1)$	$\xi = \frac{\epsilon - 1}{4\pi}$	фарада на метр (ф/м)	—	м ⁻³ ·кг ⁻¹ ·сек ⁴ ·а ²	ϵ_0	см ⁻² ·сек ²	—

Наименование величины	Формула определения в системе		Наименование и обо- значение в системе		Размерность в системе			
	МКСА	СГС	МКСА	СГС и СГСМ	МКСА	СГСЭ	СГСМ	СГС
Поток электри- ческого смещения (поток индукции)	$N = DS$		кулон (κ)	—	$\text{сек} \cdot a$	$\text{см}^{3/2} \cdot \text{э}^{1/2} \cdot \text{сек}^{-1}$	$\text{см}^{1/2} \cdot \text{э}^{1/2}$	$\text{см}^{3/2} \cdot \text{э}^{1/2} \cdot \text{сек}^{-1}$
Напряженность магнитного поля	$H = \frac{I}{2\pi r}$	$H = \frac{2I}{cr}$ (c —скорость света)	ампер на метр (а/м)	эрстед (э)	$\text{м}^{-1} \cdot a$	$\text{см}^{1/2} \cdot \text{э}^{1/2} \cdot \text{сек}^{-2}$	$\text{см}^{-1/2} \cdot \text{э}^{1/2} \cdot \text{сек}^{-1}$	$\text{см}^{-1/2} \cdot \text{э}^{1/2} \cdot \text{сек}^{-1}$
Абсолютная маг- нитная проница- емость	$\mu_a = \mu_0 \mu$ (μ — относительная магнитная проницаемость)	$\mu_a = \mu$	генри на метр (гн/м)	—	$\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{сек}^{-2} \cdot a^{-2}$	$\text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^2$	μ_0	—
Магнитная ин- дукция	$B = \mu_0 \mu \frac{I}{2\pi r}$	$B = \mu \frac{2I}{cr}$	тесла (тл)	гаусс (гс)	$\text{кг} \cdot \text{сек}^{-2} \cdot a^{-1}$	$\text{см}^{-3/2} \cdot \text{э}^{1/2}$	$\text{см}^{-1/2} \cdot \text{э}^{1/2} \cdot \text{сек}^{-1}$	$\text{см}^{-1/2} \cdot \text{э}^{1/2} \cdot \text{сек}^{-1}$
Магнитный по- ток	$\Phi = BS$		вебер (вб)	максвелл (мкс)	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{сек}^{-2} \cdot a^{-1}$	$\text{см}^{1/2} \cdot \text{э}^{1/2}$	$\text{см}^{3/2} \cdot \text{э}^{1/2} \cdot \text{сек}^{-1}$	$\text{см}^{3/2} \cdot \text{э}^{1/2} \cdot \text{сек}^{-1}$
Индуктивность	$L = \frac{\Phi}{I}$	$L = \frac{\Phi c}{I}$	генри (гн)	сантиметр (см)	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{сек}^{-2} \cdot a^{-2}$	$\text{см}^{-1} \cdot \text{сек}^2$	см	см
Магнитный мо- мент (рамки с то- ком)	$P_m = IS$	$P_m = \frac{1}{c} IS$	ампер $\times$ $\times$ кв. метр ($a \cdot \text{м}^2$)	—	$\text{м}^2 \cdot a$	$\text{см}^{7/2} \cdot \text{э}^{1/2} \cdot \text{сек}^{-2}$	$\text{см}^{5/2} \cdot \text{э}^{1/2} \cdot \text{сек}^{-1}$	$\text{см}^{5/2} \cdot \text{э}^{1/2} \cdot \text{сек}^{-1}$
Магнитодвижу- щая сила	$F = \Sigma I - nI$ (n — количество витков)	$F = \frac{1}{c} 4\pi \Sigma I$	ампер (а), ампер-ви- ток (ав)	гильберт (гб)	a	$\text{см}^{3/2} \cdot \text{э}^{1/2} \cdot \text{сек}^{-2}$	$\text{см}^{1/2} \cdot \text{э}^{1/2} \cdot \text{сек}^{-1}$	$\text{см}^{1/2} \cdot \text{э}^{1/2} \cdot \text{сек}^{-1}$
Интенсивность намагничивания (намагниченность)	$J = P_m/U$		ампер на метр (а/м)	—	$\text{м}^{-1} \cdot a$	$\text{см}^{1/2} \cdot \text{э}^{1/2} \cdot \text{сек}^{-2}$	$\text{см}^{-1/2} \cdot \text{э}^{1/2} \cdot \text{сек}^{-1}$	$\text{см}^{-1/2} \cdot \text{э}^{1/2} \cdot \text{сек}^{-1}$
Магнитная вос- приимчивость	$\chi_m = \mu - 1$	$\chi_m = \frac{\mu - 1}{4\pi}$	—	—	—	—	—	—

1.4. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Согласно системе СИ основными единицами измерения электромагнитных величин являются метр, килограмм, секунда и ампер. Построенная на этих единицах система электромагнитных величин называется МКСА (см. табл. 1.18 на стр. 19). Систему единиц МКСА обычно применяют при написании уравнений электромагнитного поля в рационализированной форме. Рационализация уравнений электромагнитного поля имеет своей целью исключение множителя 4π из наиболее важных и часто применяемых уравнений. В системе МКСА при рационализированной форме уравнений электромагнитного поля электрическая ϵ_0 и магнитная μ_0 постоянные принимаются равными:

$$\epsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c^2} = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ ф/м} \text{ и } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ гн/м},$$

где c — скорость света в вакууме, м/сек.

Государственным стандартом допускается, когда это необходимо, применение систем единиц, построен-

ных на основе системы СГС (СГСЭ, СГСМ, СГС — система Гаусса). При этом единицы всех электрических и магнитных величин выражаются через сантиметр, грамм и секунду при помощи соотношений, описывающих электрические и магнитные закономерности.

Система СГСЭ (абсолютная электростатическая система) основана на законах электростатических взаимодействий зарядов. Система СГСМ (абсолютная магнитная система) основана на магнитных взаимодействиях тока. В абсолютной гауссовой системе (СГС) единицы для всех электрических величин совпадают с единицами СГСЭ, а единицы для всех магнитных величин совпадают с единицами СГСМ.

В системе СГСЭ: $\epsilon_0 = 1$, $\mu_0 = 1,11 \cdot 10^{-21}$.

В системе СГСМ: $\mu_0 = 1$, $\epsilon_0 = 1,11 \cdot 10^{-21}$.

В системе СГС $\epsilon_0 = \mu_0 = 1$. В случае использования систем единиц СГСЭ, СГСМ, СГС уравнения электромагнитного поля записывают в нерационализированной форме.

В табл. 1.18 приведены единицы измерения электрических и магнитных величин в четырех системах: МКСА, СГСЭ, СГСМ, СГС. Соотношения между единицами электромагнитных величин различных систем приводятся в табл. 1.19.

Таблица 1.19

Соотношение между электромагнитными единицами

Наименование величины	МКСА	СГСЭ	СГСМ	СГС
Сила тока (ток)	1 а	$3 \cdot 10^9$	10^{-1}	$3 \cdot 10^9$
Количество электричества (заряд)	1 к	$3 \cdot 10^9$	10^{-1}	$3 \cdot 10^9$
Поверхностная плотность заряда	1 к/м ²	$3 \cdot 10^5$	10^{-5}	$3 \cdot 10^5$
Разность электрических потенциалов	1 в	$3,34 \cdot 10^{-3}$	10^8	$3,34 \cdot 10^{-3}$
Электрическая емкость	1 ф	$8,99 \cdot 10^{11}$	10^{-9}	$8,99 \cdot 10^{11}$
Электрическое сопротивление	1 ом	$1,11 \cdot 10^{-12}$	10^9	$1,11 \cdot 10^{-12}$
Диэлектрическая проницаемость	1 ф/м	$1,13 \cdot 10^{11}$	$1,26 \cdot 10^{-10}$	$1,13 \cdot 10^{11}$
Напряженность электрического поля	1 в/м	$3,34 \cdot 10^{-5}$	10^6	$3,34 \cdot 10^{-5}$
Электрическое смещение (электрическая индукция)	1 к/м ²	$3,77 \cdot 10^6$	$1,26 \cdot 10^{-4}$	$3,77 \cdot 10^6$
Поток электрического смещения (поток индукции)	1 к	$3,77 \cdot 10^{10}$	1,26	$3,77 \cdot 10^{10}$
Магнитный поток	1 вб	$3,34 \cdot 10^{-3}$	10^8	10^8
Магнитная индукция	1 тл	$3,34 \cdot 10^{-7}$	10^4	10^4
Напряженность магнитного поля	1 а/м	$3,77 \cdot 10^8$	$1,26 \cdot 10^{-2}$	$1,26 \cdot 10^{-2}$
Магнитная проницаемость	1 гн/м	$8,85 \cdot 10^{-16}$	$7,96 \cdot 10^5$	$7,96 \cdot 10^5$
Магнитодвижущая сила	1 а	$3,77 \cdot 10^{10}$	1,26	1,26
Магнитный момент	1 а·м ²	$3 \cdot 10^{13}$	10^3	10^3
Индуктивность (взаимная индуктивность)	1 гн	$1,11 \cdot 10^{-12}$	10^9	10^9

1.5. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Основными единицами для измерения акустических величин являются: метр, килограмм, секунда (система МКС). Государственным стандартом для измерения акустических величин допускается также применение

системы СГС. Государственным стандартом не рекомендуется применять для измерения звукового давления единицу бар. Вместо нее рекомендуется ньютон на квадратный метр, а в системе СГС допускается дин на квадратный сантиметр. В табл. 1.20 приведены акустические единицы системы МКС и системы СГС. В табл. 1.21 приведены внесистемные акустические единицы.

Единицы измерения акустических величин

Наименование величины	Система СИ (МКС)			Система СГС			Множитель перевота в единицы МКС
	Сокращенное обозначение		Размерность	Сокращенное обозначение		Размерность	
	русскими буквами	латинскими буквами		русскими буквами	латинскими буквами		
Звуковое да- вление	$н/м^2$	N/m^2	$м^{-1} \cdot кг \cdot сек^{-2}$	$дин/см^2$	dyn/cm^2	$см^{-1} \cdot г \cdot сек^{-2}$	10^{-1}
Объемная скорость	$м^3/сек$	m^3/s	$м^3 \cdot сек^{-1}$	$см^3/сек$	cm^3/s	$см^3 \cdot сек^{-1}$	10^{-6}
Акустическое сопротивление	$н \cdot сек/м^5$	$N \cdot s/m^5$	$м^{-4} \cdot кг \cdot сек^{-1}$	$дин \cdot сек/см^5$	$dyn \cdot s/cm^5$	$см^{-4} \cdot г \cdot сек^{-1}$	10^5
Механическое сопротивление	$н \cdot сек/м$	$N \cdot s/m$	$кг \cdot сек^{-1}$	$дин \cdot сек/см$	$dyn \cdot s/cm$	$г \cdot сек^{-1}$	10^{-3}
Интенсив- ность звука	$вт/м^2$	W/m^2	$кг \cdot сек^{-3}$	$эрг/(сек \cdot см^2)$	$erg/(s \cdot cm^2)$	$г \cdot сек^{-3}$	10^{-3}
Плотность звуковой энер- гии	$дж/м^3$	J/m^3	$м^{-1} \cdot кг \cdot сек^{-2}$	$эрг/см^3$	erg/cm^3	$см^{-1} \cdot г \cdot сек^{-2}$	10^{-1}

Таблица 1.21

Внесистемные акустические единицы

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное название	Определение единицы измерения
Уровень звукового давления	децибел	дБ	Уровень звукового давления, двадцать десятичных логарифмов отношения которого к условному порогу давления, равному $0,00002 \text{ н/м}^2$, принимаемому за нулевой уровень, равны единице
Уровень громкости	фон	—	Уровень громкости звука, для которого уровень звукового давления равногромкого с ним звука частотой 1000 гц равен 1 дБ
Частотный интервал	октава	—	Частотный интервал между двумя частотами, логарифм отношения которых при основании два равен единице

1.6. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ СВЕТОВЫХ ВЕЛИЧИН

Согласно Международной системе единиц основными единицами для измерения световых величин является: метр, килограмм, секунда, свеча (табл. 1.22).

Таблица 1.22

Световые единицы

Наименование величины	Обозначение и формула	Основные единицы измерения		Внесистемные единицы	
		Название и обозначение	Определение	Название и обозначение	Соотношение единиц
Сила света	I	международная свеча, <i>св</i>	$1/60$ силы света, излучаемой в направлении нормали в 1 см^2 светового эталона	—	—

Наименование величины	Образование и формула	Основные единицы измерения		Внесистемные единицы	
		Название и обозначение	Определение	Название и обозначение	Соотношение единиц
Световой поток	$\Phi = I\tau$ (τ — телесный угол)	люмен, <i>лм</i>	Световой поток, испускаемый точечным источником света силой света 1 <i>св</i> внутри телесного угла 1 <i>стер</i>	—	—
Световая энергия (количество света)	$Q = \Phi t$ (t — время)	люмен-секунда, <i>лм·сек</i>	—	—	—
Светность (светимость)	$R = \Phi/S$ (S — площадь)	люмен на квадратный метр, <i>лм/м²</i>	Светность источника, каждый квадратный метр которого даст световой поток 1 <i>лм</i>	—	—
Освещенность (интенсивность светового потока)	$E = \Phi/S$	люкс, <i>лк</i>	Освещенность поверхности, на каждый квадратный метр которой падает световой поток 1 <i>лм</i>	фот, <i>ф</i>	1 <i>лк</i> = 10^{-4} <i>ф</i>
Яркость	$B = \frac{1}{\pi} E$	нит, <i>нт</i>	Яркость площадки, дающей силу света 1 <i>св</i> с каждого квадратного метра в направлении нормали	стильб, <i>сб</i>	1 <i>нт</i> · 10^{-4} <i>сб</i>
Освечивание	$C = I$	свеча-секунда, <i>св·сек</i>	—	—	—
Количество освещения	$H = Et$	люкс-секунда, <i>лк·сек</i>	—	—	—

Таблица 1.23

1.7. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИОАКТИВНОСТИ И ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение	
		русскими буквами	латинскими буквами
Активность нуклида в радиоактивном источнике	распад в секунду	<i>распад/сек</i>	—
Плотность потока ионизирующих частиц или квантов	частица (квант) в секунду на квадратный метр	<i>частица (квант)/</i> <i>/(сек·м²)</i>	$s^{-1} \cdot m^{-2}$
Интенсивность излучения	ватт на квадратный метр	<i>вт/м²</i>	W/m²
Поглощенная доза излучения (доза излучения)	джоуль на килограмм *	<i>дж/кг</i>	J/kg
Мощность поглощенной дозы излучения (мощность дозы излучения)	ватт на килограмм	<i>вт/кг</i>	W/kg
Экспозиционная доза рентгеновского и γ -излучений	кулон на килограмм **	<i>к/кг</i>	k/kg
Мощность экспозиционной дозы рентгеновского и γ -излучений	ампер на килограмм	<i>а/кг</i>	A/kg

* Джоуль на килограмм — поглощенная доза излучения, измеряемая энергией 1 *дж* любого вида ионизирующего излучения, переданной массе 1 *кг* облученного вещества.

** Кулон на килограмм — экспозиционная доза рентгеновского и γ -излучений, при которой сопряженная корпускулярная эмиссия на килограмм сухого атмосферного воздуха производит в воздухе ионы, несущие заряд, равный одному кулону электричества каждого знака.

Внесистемные единицы измерения радиоактивности и ионизирующих излучений

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение		Множитель перевода в единицы системы СИ
		русскими буквами	латинскими буквами	
Активность нуклида в радиоактивном источнике	кюри *	кюри	Ci	$3,700 \cdot 10^{10}$
Поглощенная доза излучения (доза излучения)	рад	рад	rad	10^{-2}
Мощность поглощенной дозы излучения (мощность дозы излучения)	рад в секунду	рад/сек	rad/s	10^{-2}
Экспозиционная доза рентгеновского и γ -излучений	рентген ^{2*}	р	г	$2,57976 \cdot 10^{-4}$
Мощность экспозиционной дозы рентгеновского и γ -излучений	рентген в секунду	р/сек	г/с	$2,57976 \cdot 10^{-4}$

* Кюри — активность препарата данного нуклида, в котором в 1 сек происходит $3,700 \cdot 10^{10}$ актов распада. Масса радиоактивного нуклида, активность которого равна 1 кюри: $Q = 6,9 \cdot 10^{-14}$ АТ (Т, сек); $Q = 5,3 \cdot 10^{-13}$ АТ (Т, мин); $Q = 3,2 \cdot 10^{-10}$ АТ (Т, ч); $Q = 7,7 \cdot 10^{-9}$ АТ (Т, день); $Q = 2,8 \cdot 10^{-6}$ АТ (Т, год), где А — атомная масса; Т — период полураспада. Q — масса без нуклида-носителя, г.

^{2*} Рентген — доза рентгеновского и γ -излучений в воздухе, при которой сопряженная корпускулярная эмиссия 0,001293 г воздуха производит в воздухе ионы, несущие заряд 1 ед. СГСЭ электричества каждого знака. (Число 0,001293 г — значение массы 1 см³ воздуха при температуре 0°С и давлении 760 мм рт. ст. Доза облучения 1 р соответствует образованию $2,08 \cdot 10^6$ пар ионов в 1 см³ воздуха.)

Биологический эквивалент рентгена (бэр) — количество энергии, поглощенной живой тканью (для человека или млекопитающего) при облучении любым видом ионизирующей радиации и вызвавшей такой же биологический эффект, как поглощенная доза 1 рад рентгеновского или γ -излучения.

Доза (бэр) = доза (рад) $\times$ КК, где КК — коэффициент качества, зависящий от вида излучения (линейная плотность ионизации) рассматриваемого биологического процесса и значений тканевой дозы и мощности дозы.

1.8. НЕКОТОРЫЕ ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ В АТОМНОЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ

1. Атомная (кислородная) единица массы (а.е.м.) равна 1/16 массы атома изотопа кислорода ¹⁶O:

1 а.е.м. = $1,6597 \cdot 10^{-27}$ кг.

2. Принята новая (углеродная) атомная единица массы, равная 1/12 массы атома изотопа ¹²C:

1 а.е.м. = $1,6603 \cdot 10^{-27}$ кг.

3. Барн — единица измерения эффективного поперечного сечения ядерных реакций:

1 барн = 10^{-24} см².

Некоторые формулы электродинамики, записанные в различных системах единиц*

Величина	СИ (МКСА)	СГСМ	СГСЭ	СГС
Закон Кулона	$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$	$F = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$		$F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$
Сила, действующая на заряд в электрическом поле		$F = qE$		
Связь между напряженностью поля и смещением		$D = \epsilon_0 \epsilon E$		$D = \epsilon E$
Теорема Гаусса (поток смещения сквозь замкнутую поверхность)	$N = \oint D \cos(\widehat{\mathbf{D}, \mathbf{n}}) ds = q$ ($\mathbf{n}$ — нормальный вектор)		$N = \oint D \cos(\widehat{\mathbf{D}, \mathbf{n}}) ds = 4\pi q$	
Напряженность поля точечного заряда	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}$	$E = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \frac{q}{\epsilon r^2}$		$E = \frac{q}{\epsilon r^2}$
Напряженность поля в плоском конденсаторе	$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon}$	$E = \frac{4\pi\sigma}{\epsilon_0 \epsilon}$		$E = \frac{4\pi\sigma}{\epsilon}$
Напряженность поля в цилиндрическом конденсаторе*	$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\tau}{\epsilon r}$	$E = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \frac{2\tau}{\epsilon r}$		$E = \frac{2\tau}{\epsilon r}$
Напряженность поля на оси диполя**	$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{p_3}{\epsilon r^3}$	$E = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \frac{2p_3}{\epsilon r^3}$		$E = \frac{2p_3}{\epsilon r^3}$
Электрический момент диполя		$p_3 = ql$		
Сила взаимодействия двух диполей, расположенных на одной оси**	$f = -\frac{3}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{p_{31} p_{32}}{\epsilon r^4}$	$F = -\frac{6}{\epsilon_0} \cdot \frac{p_{31} p_{32}}{\epsilon r^4}$		$F = -\frac{6p_{31} p_{32}}{\epsilon r^4}$
Поляризованность диэлектрика		$P = \frac{p_3}{V} = E$		
Связь между диэлектрической проницаемостью и диэлектрической восприимчивостью	$\epsilon_3 = \epsilon_0 \epsilon = \epsilon_0 + \xi$	$\epsilon_3 = \epsilon_0 \epsilon = \epsilon + 4\pi \xi$		$\epsilon = 1 + 4\pi \xi$

Величина	СИ (МКСА)	СГСМ	СГСЭ	СГС
Связь между напряженностью поля и потенциалом	$E = - \operatorname{grad} U$			
Потенциал поля точечного заряда	$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{\epsilon r}$	$U = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \frac{q}{\epsilon r}$	$U = \frac{q}{\epsilon r}$	
Потенциал внутри цилиндрического конденсатора ^{4*}	$U = U_1 - Er \ln \frac{r}{R_1}$			
Связь между емкостью, зарядом и потенциалом	$q = CU$			
Емкость уединенного шара	$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R$	$C = \epsilon_0\epsilon R$	$C = \epsilon R$	
Емкость плоского конденсатора	$C = \frac{\epsilon_0\epsilon S}{l}$	$C = \frac{\epsilon_0\epsilon S}{4\pi l}$	$C = \frac{\epsilon S}{4\pi l}$	
Емкость цилиндрического конденсатора	$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon l}{\ln R_2/R_1}$	$C = \frac{\epsilon_0\epsilon l}{2\ln R_2/R_1}$	$C = \frac{\epsilon l}{2\ln R_2/R_1}$	
Емкость двухпроводной линии ^{5*}	$C = \frac{\pi\epsilon_0\epsilon l}{\ln a/R}$	$C = \frac{\epsilon_0\epsilon l}{4\pi \ln a/R}$	$C = \frac{\epsilon l}{4\pi \ln a/R}$	
Энергия заряженного проводника	$W = \frac{qU}{2} = \frac{U^2C}{2} = \frac{q^2}{2C}$			
Объемная плотность энергии электрического поля	$w = \frac{ED}{2} = \frac{\epsilon_0\epsilon E^2}{2} = \frac{D^2}{2\epsilon_0\epsilon}$	$w = \frac{ED}{8\pi} = \frac{\epsilon_0\epsilon E^2}{8\pi} = \frac{D^2}{8\pi\epsilon_0\epsilon}$	$w = \frac{ED}{8\pi} = \frac{\epsilon E^2}{8\pi} = \frac{D^2}{8\pi\epsilon}$	
Определение силы тока проводимости	$I = \frac{dq}{dt}$			
Закон Ома	$I = \frac{U}{R}$			
Мощность тока	$P = UI$			
Сила, действующая на элемент тока в магнитном поле (формула Ампера)	$dF = \mu_0\mu HI \cdot dl \sin(\widehat{H, dl})$	$dF = \mu HI \cdot dl \sin(\widehat{H, dl})$	$dF = \mu_0\mu HI \cdot dl \sin(\widehat{H, dl})$	$dF = \frac{\mu}{c} HI \cdot dl \sin(\widehat{H, dl})$
Момент, испытываемый контуром с током в магнитном поле	$M = Br_p \sin(\widehat{B, p_m})$			

Величина	СИ (МКСА)	СГСМ	СГСЭ	СГС
Магнитный момент контура с током	$p_m = Is$		$p_m = \frac{1}{c} Is$	
Работа перемещения контура с током в магнитном поле	$A = I\Delta\Psi$		$A = \frac{1}{c} I\Delta\Psi$	
Связь между индукцией и напряженностью магнитного поля	$B = \mu_0 \mu H$	$B = \mu H$	$B = \mu_0 \mu H$	$B = \mu H$
Закон Био, Савара и Лапласа	$H = \frac{1}{4\pi} \oint \frac{Idl \sin(\widehat{\mathbf{r}, d\mathbf{l}})}{r^2}$	$H = \oint \frac{Idl \sin(\widehat{\mathbf{r}, d\mathbf{l}})}{r^2}$	$H = \frac{1}{c} \oint \frac{Idl \sin(\widehat{\mathbf{r}, d\mathbf{l}})}{r^2}$	
Напряженность магнитного поля бесконечно длинного прямолинейного проводника с током	$H = \frac{I}{2\pi r}$	$H = \frac{2I}{r}$	$H = \frac{1}{c} \cdot \frac{2I}{r}$	
Напряженность поля в центре кольца, обтекаемого током	$H = \frac{I}{2R}$	$H = \frac{2\pi I}{R}$	$H = \frac{1}{c} \cdot \frac{2\pi I}{R}$	
Напряженность поля на оси длинного соленоида ^{6*}	$H = I \frac{n}{l} = In_0$	$H = 4\pi I \frac{n}{l} = 4\pi In_0$	$H = \frac{1}{c} 4\pi In_0$	
Сила взаимодействия двух параллельных токов	$F = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \cdot \frac{I_1 I_2 l}{2}$	$F = \mu \frac{2I_1 I_2 l}{r}$	$F = \mu_0 \frac{2\mu I_1 I_2 l}{r}$	$F = \frac{\mu}{c^2} \cdot \frac{2I_1 I_2 l}{r}$
Связь между магнитным потоком и магнитной индукцией	$d\Phi = B ds \cos(\widehat{\mathbf{B}, \mathbf{n}})$			
Магнитодвижущая сила	$F = \Sigma I$	$F = 4\pi \Sigma I$	$F = \frac{1}{c} 4\pi \Sigma I$	
Намагниченность	$J = \frac{p_n}{V} \chi H$			
Связь между магнитной проницаемостью и магнитной восприимчивостью	$\mu = 1 + \chi$	$\mu = 1 + 4\pi \chi$		
Связь между потокоцеплением, силой тока и индуктивностью контура	$\Psi = LI$			$\Psi = \frac{1}{c} LI$
Индуктивность соленоида ^{7*}	$L = \mu_0 \mu \frac{n^2 s}{l} = \mu_0 \mu n_0^2 V$	$L = 4\pi \mu \frac{n^2 s}{l} = 4\pi \mu n_0 V$	$L = 4\pi \mu_0 \mu \frac{n^2 s}{l} = 4\pi \mu_0 \mu n_0^2 V$	$L = 4\pi \mu \frac{n^2 s}{l} = 4\pi \mu n_0^2 V$
Индуктивность двухпроводной линии	$L = \mu_0 \frac{l}{\pi} \ln a/R$	$L = 4l \ln a/R$	$L = 4\mu_0 l \ln a/R$	$L = 4l \ln a/R$
Электродвижущая сила индукции	$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Psi}{dt}$			$\mathcal{E}_i = - \frac{1}{c} \cdot \frac{d\Psi}{dt}$

Величина	СИ (МКСА)	СГСМ	СГСЭ	СГС
Электродвижущая сила самоиндукции		$\mathcal{E}_{sl} = -L \frac{dI}{dt}$		$\mathcal{E}_{si} = -\frac{1}{c^2} \cdot \frac{dI}{dt}$
Объемная плотность энергии магнитного поля	$w = \frac{BH}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0\mu} = \frac{\mu_0\mu H^2}{2}$	$w = \frac{BH}{8\pi} = \frac{B^2}{8\pi\mu} = \frac{\mu H^2}{8\pi}$	$w = \frac{BH}{8\pi} = \frac{B^2}{8\pi\mu_0\mu} = \frac{\mu_0\mu H^2}{8\pi}$	$w = \frac{BH}{8\pi} = \frac{B^2}{8\pi\mu} = \frac{\mu H^2}{8\pi}$
Вектор Пойнтинга (плотность потока электромагнитной индукции)	$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$	$\mathbf{S} = \frac{1}{4\pi} \mathbf{E} \times \mathbf{H}$		$\mathbf{S} = \frac{c}{4\pi} \mathbf{E} \times \mathbf{H}$
Скорость распространения электромагнитных волн	$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\epsilon\mu_0\mu}}$	$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\epsilon\mu}}$	$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu_0\mu}}$	$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$
Уравнения Максвелла 1. Закон Фарадея		$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$		$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
2. Закон полного тока (закон Ампера)	$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	$\text{rot } \mathbf{H} = 4\pi \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$		$\text{rot } \mathbf{H} = \frac{1}{c} \times \left(4\pi \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right)$
3. Уравнение Пуассона (теорема Гаусса)	$\text{div } \mathbf{D} = \rho$		$\text{div } \mathbf{D} = 4\pi\rho$	
4. Непрерывность силовых линий магнитной индукции (теорема Гаусса)		$\text{div } \mathbf{B} = 0$		

* Все величины должны измеряться единицами соответствующей системы. В частности, для ϵ_0 и μ_0 должны подставляться значения: в системе СИ (МКСА) $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ ф/м}$, $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ гн/м}$; в системе СГСМ $\epsilon_0 = 1,11 \cdot 10^{-21}$, $\mu_0 = 1$; в системе СГСЭ $\epsilon_0 = 1$, $\mu_0 = 1,11 \cdot 10^{-21}$.

^{1*} τ — плотность заряда на единицу длины конденсатора.

^{2*} Предполагается, что $r \gg l$ (l — плечо диполя).

^{3*} U_1 — потенциал, R_1 — радиус внутреннего цилиндра.

^{4*} l — длина линии; R — радиус проводов; a — расстояние между проводами ($a \gg R$).

^{5*} n — общее число витков; n_0 — число витков на единицу длины.

^{7*} S — площадь сечения соленоида; n — общее число витков; n_0 — число витков на единицу длины.

ПРИМЕЧАНИЕ

О проекте нового ГОСТа единиц физических величин

В настоящее время Комитетом стандартов при Совете Министров одобрен проект нового стандарта единиц физических величин, предусматривающий унификацию единиц, применяемых в нормативно-технических документах и литературе. Новый стандарт устанавливает единицы важнейших физических величин, допускаемых к применению в СССР, их наименования, обозначения и определения. В основу совокупности единиц, устанавливаемой стандартом для обязательного применения, положены единицы Международной системы (СИ) единиц.

В настоящее время в СИ принято шесть основных единиц: метр, килограмм, секунда, кельвин, ампер, кандела. В соответствии с решениями XIII Генеральной конференции по мерам и весам даются новые определения секунды, кельвина и канделы.

Секунда — 9192631770 периодов излучения, соответствующего переходу между уровнями $F = 4$, $m_F = 0$ и $F = 3$, $m_F = 0$ основного состояния атома ^{133}Cs в отсутствие внешних полей.

Кельвин — $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды.

Кандела — единица силы света, определяется на основании того, что яркость черного излучателя при температуре затвердевания платины (около 2042°K) равна $0,6 \text{ кд} \cdot \text{мм}^{-2}$.

Государственный стандарт предусматривает изменение наименований некоторых физических величин и их новые обозначения. Эти изменения приводятся в табл. 1.26.

Стандартом допускаются к применению наравне с единицами СИ внесистемные единицы (тонна, минута, час, сутки, градус Цельсия, гектар, литр) и их сочетание с единицами СИ, а также единицы, представляющие собой десятичные кратные и дольные от этих единиц. Десятичные кратные и дольные от единиц в первой степени образуются умножением на один из множителей, помещенных в табл. 1.2.

Новый государственный стандарт вводит единицы относительных величин, имеющих собственные наименования (табл. 1.27).

Стандарт вводит некоторые изменения в обозначении единиц физических величин.

1. Разрешается применять русские или международные обозначения; одновременное применение в одном и том же издании обоих видов обозначений не допускается.

2. Для буквенных обозначений единиц должен применяться шрифт текста, в котором они используются: прямой при прямом шрифте текста и курсивный (наклонный) — при курсивном.

3. Обозначения единиц должны печататься строчными (малыми) буквами за исключением обозначений единиц, наименования которых образованы по фамилиям ученых. Эти обозначения должны печататься с прописной (заглавной) буквы. Изменения стандартом русских обозначений единиц физических величин приведены в табл. 1.28.

Таблица 1.26

Изменение наименований физических величин и их новые (соответствующие) обозначения*

Величина	Наименование единицы		Русское обозначение единицы		Международное обозначение
	Принятое ранее	По проекту стандарта	Принятое ранее	По проекту стандарта	
Термодинамическая температура Кельвина	градус Кельвина	кельвин	$^\circ\text{K}$	К	К
Разность температур	градус	1) кельвин 2) градус Цельсия	<i>град</i>	1) К 2) $^\circ\text{C}$	1) К 2) $^\circ\text{C}$
Сила света	свеча	кандела	<i>св</i>	кд	cd
Давление	ньютон на квадратный метр	паскаль	н/м^2	Па	Pa
Динамическая вязкость	ньютон-секунда на квадратный метр	паскаль-секунда	$\text{н} \cdot \text{сек/м}^2$	Па·с	P·s
Акустическое сопротивление	ньютон-секунда на метр в пятой степени	паскаль-секунда на метр в третьей степени	$\text{н} \cdot \text{сек/м}^5$	Па·с/м ⁴	Pa·s/m ⁴
Удельное акустическое сопротивление	ньютон-секунда на метр в третьей степени	паскаль-секунда на метр	$\text{н} \cdot \text{сек/м}^3$	Па·с/м	Pa·s/m

* Изменение русских обозначений физических величин приведены в табл. 1.28.

Единицы относительных величин

Наименование	Единица			Значение в единицах СИ или определение	Примечание
	Наименование	Обозначение			
		русскими буквами	латинскими буквами		
Относительная величина (безразмерное отношение физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную: к. п. д., относительное удлинение, относительная плотность и т. п.)	процент	‰	%	10 ⁻²	—
	промилле	‱	‰	10 ⁻³	—
	миллионная доля	млн ⁻¹	ppm	10 ⁻⁶	—
Логарифмическая величина (логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную)	бел	Б	В	1Б = 1g (P ₂ /P ₁) при P ₂ = 10P ₁ , 1Б = 2lg (F ₂ /F ₁) при F ₂ = √10 F ₁	P ₁ , P ₂ — одноименные энергетические величины (мощности, энергии и т. п.) F ₁ , F ₂ — одноименные «силовые» величины (напряжения, силы тока, давления и т. п.)
Частотный интервал	децибел	ДБ		0,1Б	
	октава	—	—	1 октава = log ₂ (f ₂ /f ₁) при (f ₂ /f ₁) = 2	f ₁ , f ₂ — частоты
	декада	—	—	1 декада = lg (f ₂ /f ₁) при (f ₂ /f ₁) = 10	
Количество информации	бит	бит	—	—	1 бит — количество информации, получаемое при осуществлении одного из двух равновероятных событий

Таблица 1.28

Изменение русских обозначений единиц физических величин

Наименование величины	Наименование единицы	Принятое ранее	По проекту стандарта	Наименование величины	Наименование единицы	Принятое ранее	По проекту стандарта
Время	секунда час	сек ч	с ч	Электрическое сопротивление	ом	ом	Ом
Телесный угол	стерадиан	стер	ср	Электрическая проводимость	сименс	сим	См
Частота	герц	гц	Гц	Напряженность магнитного поля	эрстед	э	Э
Длина	парсек	пс	пк	Магнитный поток	вебер	вб	Вб
Площадь	барн	барн	б	Магнитная индукция	максвелл	мкс	Мкс
Сила	ньютон	н	Н	Магнитодвижущая сила	тесла	тл	Т
Динамическая вязкость	пуаз	пз	П	Индуктивность	гаусс	гс	Гс
Кинематическая вязкость	стокс	ст	Ст	Активность нуклида в радиоактивном источнике (активность нуклида)	гильберт	гб	Гб
Работа	джоуль	дж	Дж	Распад в секунду	распад	распад	расп/с
Энергия	электрон-вольт	эв	эВ	Поток ионизирующих частиц	частица в секунду	сек частица	Ки част/с
Мощность	ватт	вт	Вт	Плотность потока ионизирующих частиц	частица в секунду на квадратный метр	сек частица м ² ·сек	Ки част/(с·м ²)
Сила электрического тока	ампер	а	А				
Количество электричества	кулон	к	Кл				
Электрическое напряжение, электрический потенциал, электродвижущая сила	вольт	в	В				
Электрическая емкость	фарада	ф	Ф				

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурдун Г. Д. Единицы физических величин. М., Стандартгиз, 1967.

2. Коэффициенты перевода единиц измерения физико-технических величин. М., Атомиздат, 1967.

3. Сена А. А. Единицы физических величин и их размерности. М., «Наука», 1969.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

В табл. 2.1 и 2.2 представлены уточненные значения фундаментальных физических постоянных, рекомендованные рабочей группой СОДАТА (август 1973 г.) [3]. Эта наиболее достоверная на сегодняшний день численная информация о фундаментальных физических по-

стоянных получена в результате анализа новейших экспериментальных данных [1]. Значения физических постоянных вычислены методом наименьших квадратов по формулам, которые выражают любую постоянную непосредственно через значения выбранных физических

Таблица 2.1

Значения фундаментальных физических постоянных в системах единиц СИ и СГС [1—3]

Наименование	Обозначение, формула	Значение	Множитель в системе единиц	
			СИ	СГС
Скорость света	c	2,99792458 (12)	$10^8 \text{ м} \cdot \text{сек}^{-1}$	$10^{10} \text{ см} \cdot \text{сек}^{-1}$
Постоянная тонкой структуры	α	7,2973506 (60)	10^{-3}	10^{-3}
Заряд электрона	e	1,6021892 (46)	10^{-19} Кл	$10^{-20} \text{ ед. СГСМ}$
Постоянная Планка	h	4,803242 (14)	—	$10^{-10} \text{ ед. СГСЭ}$
Число Авогадро	N	6,0220943 (61)	$10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{сек}$	$10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{сек}$
Атомная единица массы	$a. \text{ е. м.}$	1,0545887 (57)	$10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{сек}$	$10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{сек}$
Масса покоя электрона	m_e	6,0220943 (61)	$10^{26} \text{ Кмоль}^{-1}$	$10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Масса покоя протона	m_p	1,6605655 (86)	10^{-27} Кг	10^{-24} г
Масса покоя нейтрона	M_p	9,109534 (47)	10^{-31} Кг	10^{-28} г
Отношение массы протона к массе электрона	M_p/m_e	5,4858026 (21)	10^{-4} а. е. м.	10^{-4} а. е. м.
Отношение заряда электрона к его массе	e/m_e	1,6726485 (86)	10^{-27} Кг	10^{-24} г
Магнитный квантовый поток	Φ_0	1,007276470 (11)	10^{-27} Кг	10^{-24} г
Отношение постоянной Планка к массе электрона	$h/2m_e$	1,6749543 (86)	10^{-27} Кг	10^{-24} г
Число Фарадея	$F = Ne$	1,008665012 (37)	10^{-27} Кг	10^{-24} г
Постоянная Ридберга	$R_\infty = [\nu_0 c^2 / 4\pi] (m_e e^4 / 4\pi \hbar^3 c)$	1836,15152 (70)	10^{-27} Кг	10^{-24} г
Боровский радиус	$a_0 = [\nu_0 c^2 / 4\pi]^{-1} (\hbar^2 / m_e e^2) = \hbar^2 / 4\pi m_e e^2$	1,3795234 (46)	10^{-11} м	10^{-9} см
Классический радиус электрона	$r_0 = [\nu_0 c^2 / 4\pi] (e^2 / m_e c^2) = e^2 / 4\pi m_e c^2$	2,8179380 (70)	10^{-15} м	10^{-13} см
Магнетон Бора	$\mu_B = [c] (e \hbar / 2 m_e c)$	9,274078 (36)	$10^{-24} \text{ Дж} \cdot \text{Тл}^{-1}$	$10^{-21} \text{ эрг} \cdot \text{Гс}^{-1}$
Магнитный момент электрона в магнетонах Бора	μ_e / μ_B	1,0011596577 (35)	1	1
Магнитный момент электрона	μ_e	9,284832 (36)	$10^{-24} \text{ Дж} \cdot \text{Тл}^{-1}$	$10^{-21} \text{ эрг} \cdot \text{Гс}^{-1}$
Гиромангнитное отношение протонов в H_2O	γ_p	2,6751301 (75)	$10^8 \text{ рад} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{Тл}^{-1}$	$10^4 \text{ рад} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{Гс}^{-1}$
	$\gamma_p / 2\pi$	4,257602 (13)	$10^7 \text{ Гц} \cdot \text{Тл}^{-1}$	$10^3 \text{ Гц} \cdot \text{Гс}^{-1}$

Наименование	Обозначение, формула	Значение	Множитель в системе единиц	
			СИ	СГС
То же, исправленное на диамагнетизм в H_2O	$\gamma_p / 2\pi$	2,6751987 (75) 4,257707 (13)	$10^8 \text{ рад} \cdot \text{сек}^{-1} \times$ $\times \text{мл}^{-1}$ $10^7 \text{ гц} \cdot \text{мл}^{-1}$	$10^4 \text{ рад} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{гс}^{-1}$ $10^3 \text{ гц} \cdot \text{гс}^{-1}$
Магнитный момент протонов в H_2O магнетонах Бора	μ_p / μ_B	1,52099322 (10)	10^{-3}	10^{-3}
Магнитный момент протонов в магнетонах Бора	μ_D / μ_B	1,52102209 (16)	10^{-3}	10^{-3}
Магнитный момент протона	μ_p	1,4106171 (55)	$10^{-26} \text{ Дж} \cdot \text{мл}^{-1}$	$10^{-23} \text{ эрг} \cdot \text{гс}^{-1}$
Магнитный момент протонов в H_2O в ядерных магнетонах	μ_p' / μ_n	2,7927740 (11)	1	1
μ_p' / μ_n , исправленное на диамагнетизм H_2O	μ_p / μ_n	2,792782 (17)	1	1
Ядерный магнетон	$\mu_n = [c] \left(\frac{e\hbar}{2M_p c} \right)$	5,050824 (20)	$10^{-27} \text{ Дж} \cdot \text{мл}^{-1}$	$10^{-24} \text{ эрг} \cdot \text{гс}^{-1}$
Комптоновская длина волны электрона	$\lambda_C = \hbar / m_e c$ $\lambda_C / 2\pi$	2,4263089 (40) 3,8615905 (64)	10^{-12} м 10^{-13} м	10^{-10} см 10^{-11} см
Комптоновская длина волны протона	$\lambda_{C, p} = \hbar / M_p c$ $\lambda_{C, p} / 2\pi$	1,3214099 (22) 2,1030892 (36)	10^{-15} м 10^{-16} м	10^{-13} см 10^{-14} см
Комптоновская длина волны нейтрона	$\lambda_{C, n} = \hbar / M_n c$ $\lambda_{C, n} / 2\pi$	1,3195909 (22) 2,1001941 (35)	10^{-15} м 10^{-16} м	10^{-13} см 10^{-14} см
Газовая постоянная	R_0	8,31441 (26)	$10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}}$	$10^7 \text{ эрг} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = R_0 / N$	1,380662 (44)	$10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{град}^{-1}$	$10^{-16} \text{ эрг} \cdot \text{град}^{-1}$
Постоянная Стефана — Больцмана	$\sigma = \pi^2 k^4 / 60 \hbar^3 c^2$	5,67032 (71)	$10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \times$ $\times \text{град}^{-4}$	$10^{-5} \text{ эрг} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{град}^{-4}$
Первая постоянная излучения	$C_1 = 8\pi \hbar c$	4,992579 (38)	$10^{-24} \text{ Дж} \cdot \text{м}$	$10^{-15} \text{ эрг} \cdot \text{см}$
Вторая постоянная излучения	$C_2 = \hbar c / k$	1,438786 (45)	$10^{-2} \text{ м} \cdot \text{град}$	$\text{см} \cdot \text{град}$
Гравитационная постоянная	G	6,6720 (41)	$10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$	$10^{-3} \text{ дин} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{г}^2$
Стандартный объем идеального газа	V_0	22,41383 (70)	$\text{м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$	$10^3 \text{ см}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$

Таблица 2.2

Значения фундаментальных физических постоянных в других единицах [1—3]

Название констант	Значение
Атомная единица массы	931,5016 (26) <i>Мэв</i>
Масса электрона	0,5110034 (14) <i>Мэв</i>
Масса протона	938,2796 (27) <i>Мэв</i>
Масса нейтрона	939,5731 (27) <i>Мэв</i>
Электронвольт	1,6021892 (46) · 10 ⁻¹⁹ <i>дж</i> 1,6021892 (46) · 10 ⁻¹² <i>эрг</i> 2,4179696 (63) · 10 ¹⁴ <i>гц</i> 8,065479 (21) · 10 ⁵ <i>м·с⁻¹</i> 8,065479 (21) · 10 ⁹ <i>см·с⁻¹</i> 2,179907 (12) · 10 ⁻¹⁸ <i>дж</i>
Постоянная Ридберга R_{∞}	2,179907 (12) · 10 ⁻¹¹ <i>эрг</i> 13,605804 (36) <i>эв</i> 3,28984200 (25) · 10 ¹⁵ <i>гц</i> 1,578885 (49) · 10 ⁸ <i>град</i> 5,788378 (9) · 10 ⁻⁵ <i>эв·мл⁻¹</i> 1,3996108 (43) · 10 ¹⁰ <i>гц·мл⁻¹</i> 46,68598 (14) <i>м⁻¹·мл⁻¹</i> 46,68598 (14) · 10 ⁻² <i>см⁻¹·мл⁻¹</i> 0,671733 (29) <i>град·мл⁻¹</i>
Магнетон Бора μ_B	3,1524515 (53) · 10 ⁻⁸ <i>эв·мл⁻¹</i> 7,622700 (42) · 10 ⁸ <i>гц·мл⁻¹</i> 2,542659 (14) · 10 ⁻² <i>м⁻¹·мл⁻¹</i> 2,542659 (14) · 10 ⁻⁴ <i>см⁻¹·мл⁻¹</i> 3,65846 (16) · 10 ⁻⁴ <i>град·мл⁻¹</i>
Ядерный магнетон μ_n	8,20562 (35) · 10 ⁻² <i>м³·атм·кмоль⁻¹·град⁻¹</i>
Газовая постоянная	

постоянных в комбинации с так называемыми вспомогательными константами, которые можно считать точно известными. Выбранными физическими постоянными являются: α^{-1} — обратная величина постоянной тонкой структуры; e — заряд электрона; N — число Авогадро. Примером вспомогательной константы является R_{∞} — постоянная Ридберга для бесконечной массы, значение которой известно с точностью до $1 \cdot 10^{-7}$.

В табл. 2.1 значения физических постоянных из колонки 3 нужно умножить на соответствующие множители для систем СИ и СГС из колонок 4 и 5. Числа в скобках в табл. 2.1 и 2.2 — стандартные отклонения в последних двух значащих цифрах числа. В формулах для обозначения констант в системе СГС употребляется выражение, стоящее в круглых скобках (в колонке 2). При переходе к системе СИ выражение в круглых скобках нужно умножить на коэффициент в квадратных скобках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Taylor B. N., Parker W. H., Langenberg D. N. Rev. Mod. Phys., 1969, v. 41, p. 375; Тейлор Б., Паркер В., Лаингенберг Д. Фундаментальные константы и квантовая электродинамика. Пер. с англ. Под ред. Б. А. Мырина. М., Атомиздат, 1972.
2. Barash—Schmidt N. e. a. Particle Properties. CERN. April. 1974; Physics Letters, v. 50B, N 1, 1974.
3. Фундаментальные константы физики и химии. Рекомендации по представлению в первичной литературе численных экспериментальных данных Пер. с англ. М., ВНИИ ГСССД, 1975. (CODATA, 1973, No. 11); Успехи физ. наук, 1975, т. 115, в. 4, с. 623.

ГЛАВА 3

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ

Периодическая система отражает закон изменения физико-химических свойств элементов с изменением заряда ядра Z и числа электронов во внешней оболочке атомов (периодический закон).

В первоначальном варианте таблицы Д. И. Менделеева элементы располагались в порядке возрастания атомных масс и группировались по сходству химических свойств. Объяснение периодическому закону в структуре периодической системы в дальнейшем было дано на основе квантовой теории строения атома. Оказалось, что последовательность расположения элементов в таблице определяется зарядом ядра, а периодичность физико-химических свойств связана с существованием электронных оболочек атома, постепенно заполняющихся с возрастанием Z .

Состояние электрона в атоме определяется главным квантовым числом n , орбитальным квантовым числом l , его проекцией m , спинным числом s и его проекцией σ . Электроны с разными n и l составляют разные обо-

лочки. С учетом принципа Паули число электронов в оболочке с индексом l не может быть больше $2(2l + 1)$. В зависимости от значения $l = 0, 1, 2, \dots$ оболочки обозначают буквами $s, p, d, f, \dots$.

Современная таблица химических элементов составлена таким образом, что при переходе от какого-либо атома к следующему заряд увеличивается на единицу и к оболочке добавляется один электрон. Заряд ядра определяет порядковый номер элемента.

По способу заполнения электронных оболочек все элементы разбиты на периоды. В первый период входят два элемента (H, He), у которых застраивается $1s^2$ -оболочка. Второго и третьего периоды содержат по 8 элементов, у которых застраиваются сначала s^2 -оболочки ($2s^2$ и $3s^2$), а затем — p^6 -оболочки ($2p^6$ и $3p^6$). Первые три периода обычно называют малыми.

Периоды с четвертого по седьмой занимают в таблице по два ряда и обычно называются большими. У элементов четвертого и пятого периодов прежде всего

ПЕРИ-ОДЫ ↓	Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т О В									
	I	II	III	IV	V					
2	Li 6,939 3 ЛИТИЙ 2s ¹	Be 9,0122 4 БЕРИЛЛИЙ 2s ²	5 10,811 10; 11 2s ² 2p ¹ B БОР	6 12,01115 12; 13 2s ² 2p ² C УГЛЕРОД	7 14,0067 14; 15 2s ² 2p ³ N АЗОТ					
3	Na 22,9898 11 НАТРИЙ 3s ¹	Mg 24,312 12 24-26 МАГНИЙ 3s ²	13 26,9815 27 3s ² 3p ¹ Al АЛЮМИНИЙ	14 28,086 28-30 3s ² 3p ² Si КРЕМНИЙ	15 30,9738 31 3s ² 3p ³ P ФОСФОР					
4	K 39,102 19 КАЛИЙ 4s ¹	Ca 40,08 20 КАЛЬЦИЙ 4s ²	Sc 44,956 21 СКАНДИЙ 3d ¹ 4s ²	Ti 47,90 22 ТИТАН 3d ² 4s ²	V 50,942 23 ВАНАДИЙ 3d ³ 4s ²					
	29 63,546 63; 65 (3d ¹⁰) 4s ¹ Cu МЕДЬ	30 65,37 64 66-68 3d ¹⁰ 4s ² Zn ЦИНК	31 69,72 69; 71 4s ² 4p ¹ Ga ГАЛЛИЙ	32 72,59 70; 72-74 76 4s ² 4p ² Ge ГЕРМАНИЙ	33 74,9216 75 4s ² 4p ³ As МЫШЬЯК					
5	Rb 85,47 37 РУБИДИЙ 5s ¹	Sr 87,62 38 СТРОНЦИЙ 5s ²	Y 88,905 39 ИТТРИЙ 4d ¹ 5s ²	Zr 91,22 40 ЦИРКОНИЙ 4d ² 5s ²	Nb 92,906 41 НИОБИЙ 4d ⁴ 5s ¹					
	47 107,868 107; 109 4d ¹⁰ 5s ¹ Ag СЕРЕБРО	48 112,40 106 108 110-112 113; 114 4d ¹⁰ 5s ² Cd КАДМИЙ	49 114,82 113 5s ² 5p ¹ In ИНДИЙ	50 118,69 112 114-120 5s ² 5p ² Sn ОЛОВО	51 121,75 121; 123 5s ² 5p ³ Sb СУРЬМА					
6	Cs 132,905 55 ЦЕЗИЙ 6s ¹	Ba 137,34 56 БАРИЙ 6s ²	La 138,91 57 ЛАНТАН 5d ¹ 6s ²	Hf 178,49 72 ГАФНИЙ 5d ² 6s ²	Ta 180,948 73 ТАНТАЛ 5d ³ 6s ²					
	79 196,967 197 (5d ¹⁰) 6s ¹ Au ЗОЛОТО	80 200,59 196 198-202 5d ¹⁰ 6s ² Hg РТУТЬ	81 204,37 203; 205 6s ² 6p ¹ Tl ТАЛЛИЙ	82 207,19 204; 206-208 6s ² 6p ² Pb СВИНЕЦ	83 208,980 209 6s ² 6p ³ Bi ВИСМУТ					
7	Fr [223] 87 219 223β ⁻ 7s ¹ ФРАНЦИЙ	Ra [226] 88 (218) 220-224 226 7s ² РАДИЙ	Ac [227] 89 225 227α, β ⁻ 6d ¹ 7s ² АКТИНИЙ	Ku [260] 104 260α(264) (266-270) (272)(6d ⁷ 7s ²) КУРЧАТОВИЙ	Ns 273 105 (271) НИЛЬСБОРИЙ(6d ³ 7s ²)					

* ЛАНТАНОИДЫ

140,12 4f ² 6s ² 58 136, 138 140 ЦЕРИЙ	140,907 4f ³ 6s ² 59 141 ПРАЗЕОДИМ	144,24 4f ⁴ 6s ² 60 142-146 148-150 НЕОДИМ	[145] 4f ⁵ 6s ² 61 145ε 147P ПРОМЕТИЙ	150,35 4f ⁶ 6s ² 62 144 146 147 148-150 152 154 САМАРИЙ	151,96 4f ⁷ 6s ² 63 151; 153 ЕВРОПИЙ	157,25 4f ⁷ 5d ¹ 6s ² 64 150 152 154-158 160 ГАДОЛИНИЙ
---	--	---	--	---	--	---

** АКТИНОИДЫ

232,038 6d ² 7s ² 90 224 226-230 232 ТОРИЙ	[231] 5f ² 6d ¹ 7s ² 91 231 ПРОТАКТИНИЙ	238,03 5f ³ 6d ¹ 7s ² 92 230 232-235; 236 238 УРАН	[237] 5f ⁴ 6d ¹ 7s ² 93 237 НЕПТУНИЙ	[244] 5f ⁶ 7s ² 94 236 238-240; 242 244 ПЛУТОНИЙ	[243] 5f ⁷ 7s ² 95 241; 243 АМЕРИЦИЙ	[247] 5f ⁷ 6d ¹ 7s ² 96 240 242 244-246 247; 248- 250α КЮРИЙ
--	--	---	---	--	--	--

застраиваются s²-оболочки (4s² и 5s²). После этого заполняются d¹⁰-оболочки предыдущих слоев (3d¹⁰ и 4d¹⁰) и, наконец, p⁶-оболочки (4p⁶ и 5p⁶). Оба эти периода содержат по 18 элементов.

Оболочки элементов шестого и седьмого периодов также застраиваются в одинаковой последовательности: сначала заполняются внешние s²-оболочки (6s² и 7s²), после этого появляется один электрон на предыдущей

d-оболочке (в атомах La и Ac), но в последующих элементах в основном заполняются более глубокие f-оболочки (4f¹⁴ и 5f¹⁴) и лишь после этого застраиваются d-оболочки (5d¹⁰ и 6d¹⁰).

Элементы, у которых заполняются не внешние, а более глубокие оболочки, называются переходными. Так, в четвертом периоде к переходным относятся элементы от Sc до Zn, у которых застраиваются 3d-оболочки, в

		VII	VIII	↓ ПЕРИ- ОДЫ	ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ
		1,00797 1;2 H ¹ 1s ¹ ВОДОРОД	4,0026 3;4 He ² 1s ² ГЕЛИЙ	1	
VI					
8 15,9994 16-18 O 2s ² 2p ⁴ КИСЛОРОД	9 18,9984 19 F 2s ² 2p ⁵ ФТОР	20,183 20-22 Ne ¹⁰ 2s ² 2p ⁶ НЕОН	2		
16 32,064 32-34;36 S 3s ² 3p ⁴ СЕРА	17 35,453 35;37 Cl 3s ² 3p ⁵ ХЛОР	39,948 36 38;40 Ar ¹⁸ 3s ² 3p ⁶ АРГОН	3		
Cr ^{51,996} 24 50 52-54 ХРОМ 3d ⁵ 4s ¹	Mn ^{54,9380} 25 55 МАРГАНЕЦ 3d ⁵ 4s ²	ТРИАДЫ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ →	26 55,847 54 56-58 3d ⁶ 4s ² Fe ЖЕЛЕЗО	27 58,9332 59 3d ⁷ 4s ² Co КОБАЛЬТ	28 58,71 58 60-62;64 3d ⁸ 4s ² Ni НИКЕЛЬ
34 78,96 74 76-78 80 82 Se 4s ² 4p ⁴ СЕЛЕН	35 79,904 79;81 Br 4s ² 4p ⁵ БРОМ	83,80 78 80;82-84 86 Kr ³⁶ 4s ² 4p ⁶ КРИПТОН	4		
Mo ^{95,94} 42 92 94-97 МОЛИБДЕН 4d ⁵ 5s ¹	[97] 43 97E;98β;99β- Tc ТЕХНЕЦИЙ 4d ⁵ 5s ²	ТРИАДЫ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ →	44 101,07 96 98-102 104 4d ⁷ 5s ¹ Ru РУТЕНИЙ	45 102,905 103 4d ⁸ 5s ¹ Rh РОДИЙ	46 106,4 102 104-106;108 110 4d ¹⁰ Pd ПАЛЛАДИЙ
52 127,60 120 122-126 128 130 Te 5s ² 5p ⁴ ТЕЛЛУР	53 126,9044 127 I 5s ² 5p ⁵ ИОД	131,30 124 126 128-132 134 136 5s ² 5p ⁶ Xe ⁵⁴ КСЕНОН	5		
W ^{183,85} 74 180 182-184 186 ВОЛЬФРАМ 5d ⁴ 6s ²	186,2 185 187β- Re РЕНИЙ 5d ⁵ 6s ²	ТРИАДЫ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	76 190,2 184 186-190;192 5d ⁶ 6s ² Os ОСМИЙ	77 192,2 191;193 5d ⁷ 6s ² Ir ИРИДИЙ	78 195,09 190 192 194;195;196 198 5d ⁸ 6s ¹ Pt ПЛАТИНА
84 [209] 208E;α;209E;α 210-214 216 6s ² 6p ⁴ Po ПОЛОНИЙ	85 [210] 210E;α 215 6s ² 6p ⁵ At АСТАТ	[222] 212 (214) 216-218 220 222 6s ² 6p ⁶ Rn ⁸⁶ РАДОН	6		
106 0-		112 i	7		

158,924 4f ⁹ 6s ² 65 Tb 159 ТЕРБИЙ	162,50 4f ¹⁰ 6s ² 66 Dy 156 160-164 ДИСПРОЗИЙ	164,930 4f ¹¹ 6s ² 67 Ho 165 ГОЛЬМИЙ	167,26 4f ¹² 6s ² 68 Er 162 164 166-168 170 ЭРБИЙ	168,934 4f ¹³ 6s ² 69 Tm 169 ТУЛИЙ	173,04 (4f ¹⁴ 6s ²) 70 Yb 168 170-174 176 ИТТЕРБИЙ	174,97 5d ¹ 6s ² 71 Lu 175 176β- ЛЮТЕЦИЙ
---	---	---	--	---	--	--

[247] 97 (5f ⁸ 6d ¹ 7s ²) 247 Bk БЕРКЛИЙ	[249] 98 (5f ⁹ 6d ¹ 7s ²) 246 248-252 254α Cf КАЛИФОРНИЙ	[254] (5f ¹⁰ 7s ²) 99 253 254α;β- Es ЭЙНШТЕЙНИЙ	[257] 100 (5f ¹² 7s ²) 250 252 254-258 (260) Fm ФЕРМИЙ	(5f ¹³ 7s ²) (259) 101 252 α, ε 251(E)α 257(E)α (258) 254-α, ε 255-α, ε 258 α, ε Md МЕНДЕЛЕВИЙ	(5f ¹⁴ 7s ²) 102 251(E)α 257(E)α (258) (260) (260-264) No (НОБЕЛИЙ)	(5f ¹⁴ 6d ¹ 7s ²) 103 (265) 256(E)α 258 259(E)α Lr ЛОУРЕНСИЙ
---	---	---	--	--	---	---

пятом — от Y до Cd (4d-переходные элементы), в шестом — от La до Hg, в седьмом — все элементы, стоящие после Ac.

Седьмой период остался недостроенным, поскольку у элементов с $Z > 83$ отсутствуют устойчивые изотопы, причем их нестабильность возрастает с увеличением Z . Таблица, таким образом, заканчивается последним из полученных искусственным путем элементов Ns.

Неустановившиеся названия, недостоверные электронные конфигурации и гипотетические массовые числа наиболее долгоживущих изотопов радиоактивных элементов приведены в скобках.

Взаимодействие электронов в оболочках приводит к тому, что у некоторых элементов оболочки заполняются не так, как им предписывает система: в четвертом периоде в атомах Cr и Cu число d -электронов увеличивает-

ся на два по сравнению с предшествующими и V и Ni за счет одного из 4s-электронов; в пятом периоде подобная «аномалия» наблюдается у Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, причем у Pd в d-оболочку «переходят» оба 5s-электрона; наконец, в шестом периоде на один s-электрон меньше, чем остальные, имеют атомы Os, Pt и Au; в f-переходных металлах «конкурируют» по энергии d- и f-состояния, поэтому у некоторых элементов очередной электрон попадает не в 4f (5f)-, а в 5d (6d)-оболочку: это происходит у Gd, Tb, Lu в группе редких земель и у Pa, U, Np, Cm, Bk, Lw — в группе актиноидов.

Кроме горизонтального разделения элементов в таблице по периодам производится вертикальное разделение их по группам. Элементы, входящие в каждую группу, имеют одинаковое строение внешних электронных оболочек. В помещенном на развороте «коротком» варианте таблицы каждый из больших периодов разбит на два ряда, помещенных один под другим, поэтому наряду с главными группами возникает побочные (промежуточные). В первых двух группах главную подгруппу составляют элементы, имеющие соответственно один и два s-электрона на внешней оболочке (2, 3, 4, 6, 8 и 10-й ряды), а в побочную подгруппу выделяются элементы с конфигурациями внешних оболочек $d^{10}s^2$ и $d^{10}s^2$ (5, 7, 9-й ряды). В группах с III по VII переходные элементы относятся к побочным подгруппам (4, 6, 8, 10-й ряды), а элементы с незаполненными p-оболочками — к главным (2, 3, 5, 7, 9-й ряды). Водород может быть отнесен к первой главной подгруппе, как имеющий один электрон в s-оболочке, и к седьмой, поскольку ему не хватает до заполненной оболочки одного электрона (пунктирная линия в таблице указывает на эти две возможности). У элементов благородных газов, составляющих восьмую группу, застроены все оболочки. Эти элементы замыкают периоды. Названия элементов главных подгрупп в таблице смещены влево, а побочных — вправо. В отдельные группы (триады) выделяются переходные элементы с почти заполненными d-оболочками (группы Fe, Pd и Pt). Особые группы составляют также элементы с застраиваемыми 4f- и 5f-оболочками (лантаноиды и актиноиды).

Многие физические свойства элементов связаны с положением, которое они занимают в периодической системе. Так, атомные веса элементов возрастают с увеличением порядкового номера (исключение из этого правила составляют пары Ag—K, Co—Ni, Te—J); некоторые свойства элементов в конденсированной фазе определяются их принадлежностью к той или иной группе: все чистые полупроводники входят в четвертую главную подгруппу (C, Si, Ge, Sn), только переходные металлы с незастроенными d- или f-оболочками обладают ферромагнитными (Fe, Co, Ni, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb) и антиферромагнитными (Cr, Mn, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu) свойствами и т. д. Химические свойства элементов, входящих в одну группу, также сходны.

Наряду с рассмотренной здесь короткой формой системы элементов часто используют длинную, в которой нет подгрупп, а всем элементам, имеющим одинаковую структуру внешних электронных оболочек, отводится по отдельной группе [1]. «Длинную» таблицу нередко изображают в ступенчатой форме (рис. 3.1),

1H	2He	3Li	4Be	5B	6C	7N	8O	9F	10Ne	11Na	12Mg	13Al	14Si	15P	16S	17Cl	18Ar	19K	20Ca	21Sc	22Ti	23V	24Cr	25Mn	26Fe	27Co	28Ni	29Cu	30Zn	31Ga	32Ge	33As	34Se	35Br	36Kr	37Rb	38Sr	39Y	40Zr	41Nb	42Mo	43Tc	44Ru	45Rh	46Pd	47Ag	48Cd	49In	50Sn	51Sb	52Te	53I	54Xe	55Cs	56Ba	57La	58Ce	59Pr	60Nd	61Pm	62Sm	63Eu	64Gd	65Tb	66Dy	67Ho	68Er	69Tm	70Yb	71Lu	72Hf	73Ta	74W	75Re	76Os	77Ir	78Pt	79Au	80Hg	81Tl	82Pb	83Bi	84Po	85At	86Rn	87Fr	88Ra	89Ac	90Th	91Pa	92U	93Np	94Pu	95Am	96Cm	97Bk	98Cf
----	-----	-----	-----	----	----	----	----	----	------	------	------	------	------	-----	-----	------	------	-----	------	------	------	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-----	------	------	------	------	------	------

Рис. 3.1. «Длинная» периодическая система элементов

располагая периоды один за другим симметрично от носителя осн таблицы, а элементы, принадлежащие к одной группе, соединяя линиями [2]. Предложены также другие варианты изображения системы в виде различных кривых (спиралей, круговых диаграмм и т. п.). Но короткая форма, введенная Д. И. Менделеевым, остается наиболее общепотребительной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lexikon der Physik. Bd 3. Stuttgart, 1969.
2. Handbuch der Physik. Bd 36. Springer Verlag, 1956.

II. МЕХАНИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

ГЛАВА 4

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

4.1. МЕТАЛЛЫ

В таблицах приведены предел текучести σ_T , временное сопротивление разрыву $\sigma_{вр}$, модуль упругости E , модуль сдвига G , вязкость η , твердость материала по Бринеллю H_B (иногда твердость материала указана по Роквеллу H_R , в обоих случаях твердость пересчитана в единицу системы СИ).

Модуль продольной упругости (модуль Юнга) E и

модуль сдвига G для однородных и изотропных материалов связаны с коэффициентом Пуассона μ (отношением поперечного сжатия на единицу ширины к продольному удлинению на единицу длины):

$$G = E/2(1 + \mu).$$

Твердость материала связана с временным сопротивлением разрыву соотношением $\sigma_{вр} \approx H_B/3$.

Таблица 4.1

Упругие свойства металлов [2, 6]

Материал	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м ²	σ_T , 10^7 н/м ²	H_B , 10^7 н/м ²	E , 10^{10} н/м ²	G , 10^{10} н/м ²	μ	η (при $t = 30^\circ\text{C}$), 10^7 $\frac{\text{кг}}{\text{см} \cdot \text{сек}}$
Алюминий отожженный	8,96—10,75 [1]	5,63—6,44 [1]	18,4 [1]	6,85 [1]	2,45 [1]	0,359—0,369 [1]	1,25
Ванадий отожженный	56,5	52,2	74,2	14,8	—	—	—
Висмут литой	—	—	—	3,19 [2]	1,2 [2]	0,33 [2]	—
Вольфрам отожженный	69,9—80,9	10,8	196*—245 [2]	34,2—40	8,8—21,5	—	9,37 [5]
Железо литое	1,84—22,5 [2]	—	—	10—13 [2]	3,5—5,3 [2]	0,23—0,31 [2]	14
Золото отожженное	12,4	—	18,9	8,06	2,91	0,422 [3]	12
Индий	5,05 [1]	3,0 [1]	0,98 [1]	5,2 [2]	—	—	10
Иридий	—	—	212 [4]	5,2 [2]	—	—	—
Кадмий литой	—	—	—	4,99 [2]	1,92 [2]	0,3 [2]	—
Кадмий	6,3	—	19,6	5,2	—	—	—
Кальций	6,0 [6]	—	41,6 [6]	—	—	—	—
Кобальт отожженный	48,9	—	129,2	19,6—20,6	—	—	—
Магний литой	29,4	11,2	4,4	15,6	0,35	—	—
Медь деформированная	20—25 [7]	6,85 [7]	52 [7]	11,2 [7]	4,15 [7]	0,358—0,378 [7]	4,83** [7]
Молибден литой	30,8	29,4	1348* [9]	30900* [3]	11810* [3]	0,324	—
Никель отожженный	34,3—56,1	20,5	90—120	20,2 [2]	7,7 [2]	0,300 [2]	6,3 [10]
Ниобий отожженный	32,2—40,6	—	73,5	15,6	—	—	—
Олово литое	1,47—2,4	1,17	4,8—5,2	4,06—5,86	1,64—4,78	0,33	36 [10]
Осми	—	—	348,7	55,5	—	—	—
Палладий литой	18,2	—	31	11,3 [2]	5,11	0,393 [2]	—
Платина отожженная	14,0	—	29,9	14,7	6,09	0,387 [2]	1,7 [10]
Родий отожженный	55	—	54	27,5	—	—	—
Рутений отожженный	—	—	179,5	42,2	—	—	—
Свинец литой	1,47—1,76	0,49—0,98	3,75—4,18	1,62 [2]	0,562 [2]	0,446	16 [10]
Серебро отожженное	13,5	—	20,6	8,05	2,59	0,38—0,407 [8]	2,24 [8]
Тантал отожженный	31—44,7	—	44,1—122,4	18,6	—	—	—
Титан отожженный	29,6	7,5	102,8	—	—	—	—
Хром отожженный	—	—	68,8	—	—	—	—
Цинк литой	2,94—3,92	—	29,2—44,1	12,7	—	—	410
Цирконий	24,7	11,3	33,3	—	—	—	—

* Для спеченного штабика.

** При $t = 15^\circ\text{C}$.

** При $t = 45^\circ\text{C}$.

4.2. СТАЛИ

Таблица 4.2

Упругие свойства сталей различных марок.

Для сталей различных марок $E = (19,5 \div 20,6) \cdot 10^{10}$ н/м², $G = (7,9 \div 8,9) \cdot 10^{10}$ н/м², $\mu = 0,23 \div 0,31$ [17]

Марка (состав, вес. %)		$\sigma_{вр} \cdot 10^7$ н/м ²	$\sigma_{т} \cdot 10^7$ н/м ²	$H_B \cdot 10^7$ н/м ²
Ст. 0,8	(Fe; 0,05—0,1% C; 0,17—0,37% Si)	32,4	20,5	128,3
Ст. 10	(Fe; 0,07—0,013% C; 0,17—0,37% Si)	35,2	21,5	134,1
Ст. 20	(Fe; 0,17—0,24% C; 0,17—0,37% Si; 0,35—0,65% Mn)	52	43	152,1
Ст. 30	(Fe; 0,27—0,35% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn)	50,9—60,9	29,2	175,3
Ст. 40	(Fe; 0,37—0,44% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn)	59—71,3	33,4	212,2
Ст. 55	(Fe; 0,52—0,6% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn)	69,5—81,6	39,2	249,7
Ст. 70	(Fe; 0,67—0,75% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn)	76,4—88	43,0	263,4
Ст. 85	(Fe; 0,82—0,9% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn)	112,6	98	295,7
15Г	(Fe; 0,22—0,18% C; 0,17—0,37% Si; 0,7—0,1% Mn)	43—53	24,5	159,6
30Г	(Fe; 0,27—0,34% C; 0,17—0,37% Si; 0,7—0,1% Mn)	56,9—66,8	31,7	212,4
45Г	(Fe; 0,42—0,49% C; 0,17—0,37% Si; 0,7—0,1% Mn)	67,8—79,1	37,2	236
60Г	(Fe; 0,57—0,65% C; 0,17—0,37% Si; 0,9—1,2% Mn)	78,5—90	43	263,4
70Г	(Fe; 0,67—0,75% C; 0,17—0,37% Si; 0,9—1,2% Mn)	82—94	47	263,4
10Г2	(Fe; 0,07—0,12% C; 0,17—0,37% Si; 1,2—1,6% Mn)	41—57	26,4	182,9
30Г2	(Fe; 0,27—0,34% C; 0,17—0,37% Si; 1,4—1,8% Mn)	64,9—74,4	39,1	237
45Г2	(Fe; 0,42—0,49% C; 0,17—0,37% Si; 1,4—1,8% Mn)	78,2—90	47,8	239,7
50Г2	(Fe; 0,47—0,55% C; 0,17—0,37% Si; 1,4—1,8% Mn)	81,2—93	50,8	242,4
2Х13	(Fe; 0,16—0,24% C; 12,0—14,0% Cr; ≤0,6% Si; ≤0,6% Mn; ≤0,025% S; ≤0,03% P)	68,6	53	212,4—263,4
25ГЛ	(Fe; 0,2—0,3% C; 1,35—1,55% Si; 0,3—0,45% Mn)	49—54	29,4—34,3	134,1—136,1
25Г2Л	(Fe; 0,2—0,3% C; 1,7—1,9% Si; 0,3—0,45% Mn)	59—68,7	34,3—44	205,6
40ГЛ	(Fe; 0,35—0,45% C; 1,35—1,55% Si; 0,3—0,45% Mn)	60	39,4	195,8
ХН20	(Fe; 0,39% C; 0,86% Mn; 0,37% Si; 0,67% Cr; 1,78% Ni)	80,1	48	—
30ХМЛ	(Fe; 0,3% C; 0,8% Mn; 0,4% Si; 0,8% Cr; 0,2% Mo)	80,1	67,8	216,2
40ХГЛ	(Fe; 0,39% C; 1,38% Mn; 0,57% Si; 0,63% Cr)	89	54	—
30Н2ХГЛМ	(Fe; 0,3—0,35% C; 0,5—1,0% Mn; 0,6—0,9% Cr; 1,75—2,25% Ni; 0,15—0,25% Mo)	73,3—156,7	53,9—127,3	—
Г13Л	(Fe; 1,0—1,5% C; 10—15% Mn; ≤10% Si)	78,2—98	24,5—39,1	165,3—195,8
30МЛ	(Fe; 0,25—0,35% C; 0,5—0,8% Mn; 0,25—0,45% Si; 0,25—0,3% Cr; 0,3% Ni; 0,05% S; 0,05% P)	46	22,1	123
Х25Н2Л	(Fe; 0,4—0,6% C; 0,4—0,7% Mn; 1,0—2,0% Si; 24—25% Cr; 1,5—2,0% Ni; 0,04% Si; 0,04% P) (при $t = 200^\circ\text{C}$)	38,4—43,3	14,4—15,4	198,7
15Х, зака- ленная	(Fe; 0,12—0,18% C; 0,17—0,37% Si; 0,4—0,7% Mn; ≤0,035% S; ≤0,035% P; 0,7—1,0% Cr; ≤0,25% Ni; ≤0,2% Cu)	12	57,8	—
20Х, зака- ленная	(Fe; 0,17—0,23% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn; ≤0,035% S; ≤0,035% P; 0,7—1,0% Cr; ≤0,25% Ni; ≤0,2% Cu)	77	57,8	—
40Х, зака- ленная	(Fe; 0,37—0,45% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn; ≤0,035% S; ≤0,035% P; 0,8—1,1% Cr; 0,25% Ni; ≤0,2% Cu)	115—121	87,5—88,5	372,5—396,5
30ХМ, за- каленная	(Fe; 0,26—0,34% C; 0,17—0,37% Si; 0,4—0,7% Mn; ≤0,035% S; ≤0,035% P; 0,8—1,1% Cr; 0,15—0,25% Mo; ≤0,025% Ni; ≤0,2% Cu)	96	81,9	—
33ХС, за- каленная	(Fe; 0,3—0,38% C; 1,0—1,3% Si; 0,3—0,6% Mn; ≤0,035% S; ≤0,035% P; 1,3—1,6% Cr; ≤0,25% Ni; ≤0,25% Cu)	91	76,9	—
40ХС, за- каленная	(Fe; 0,37—0,45% C; 1,2—1,6% Si; 0,3—0,6% Mn; ≤0,035% S; ≤0,035% P; 1,3—1,6% Cr; ≤0,25% Ni; ≤0,2% Cu)	120	106	—
20ХГ, за- каленная	(Fe; 0,17—0,23% C; 0,17—0,37% Si; 0,9—1,2% Mn; ≤0,035% S; ≤0,035% P; 0,9—1,2% Cr; ≤0,25% Ni; ≤0,2% Cu)	86,2	72	—
40ХГ, за- каленная	(Fe; 0,37—0,45% C; 0,17—0,37% Si; 0,9—1,2% Mn; ≤0,035% S; ≤0,035% P; 0,9—1,2% Cr; ≤0,25% Ni; 0,2% Cu)	96	77	—

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{\text{вр}}, 10^7 \text{ н/м}^2$	$\sigma_{\text{т}}, 10^7 \text{ н/м}^2$	$H_B, 10^3 \text{ н/м}^2$
30ХГТ, закаленная (Fe; 0,24—0,32% C; 0,17—0,37% Si; 0,8—1,1% Mn; $\leq 0,035\%$ S; $\leq 0,035\%$ P; $\leq 0,2\%$ Cu; 1,0—1,3% Cr; $\leq 0,25\%$ Ni; 0,06—0,12% Ti)	144	125	—
35СГ, закаленная (Fe; 0,32—0,4% C; 1,1—1,4% Si; 1,1—1,4% Mn; $\leq 0,35\%$ S; $\leq 0,35\%$ P; $\leq 0,25\%$ Cr; $\leq 0,25\%$ Ni; $\leq 0,2\%$ Cu)	86,2	—	—
35ХГСА, закаленная (Fe; 0,32—0,39% C; 1,1—1,4% Si; 0,8—1,1% Mn; $\leq 0,025\%$ S; $\leq 0,025\%$ P; 1,1—1,4% Cr; $\leq 0,2\%$ Ni; $\leq 0,2\%$ Cu)	160	134,1	—
25Н, закаленная (Fe; 0,2—0,3% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn; $\leq 0,04\%$ S; $\leq 0,04\%$ P; 0,3% Cr; $\leq 0,5—0,9\%$ Ni; $\leq 0,3\%$ Cu)	64,3—73	48—59,5	—
30Н, закаленная (Fe; 0,25—0,35% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn; $\leq 0,04\%$ S; $\leq 0,04\%$ P; 0,3% Cr; 0,8—1,2% Ni; $\leq 0,3\%$ Cu)	63,2—73	48—59,5	—
20ХН, закаленная (Fe; 0,17—0,23% C; 0,17—0,37% Si; 0,4—0,7% Mn; $\leq 0,035\%$ S; $\leq 0,035\%$ P; $\leq 0,2\%$ Cu; 0,45—0,75% Cr; 1,0—1,4% Ni)	96	78,7	—
40ХН, закаленная (Fe; 0,45% C; 0,83% Mn; 0,66% Cr; 1,25% Ni)	102,2	91	275,8
12ХН2, закаленная (Fe; 0,16% C; 0,55% Mn; 0,55% Cr; 2,08% Ni)	102	86,2	298,6
20ХН3А, закаленная (Fe; 0,23% C; 0,37% Mn; 0,71% Cr; 3,71% Ni)	39,5	28,0	—
30ХН3А, закаленная (Fe; 0,35% C; 0,56% Mn; 0,71% Cr; 3,34% Ni)	63	57,2	—
12Х2Н4А, закаленная (Fe; 0,28% C; 0,5% Mn; 1,5% Cr; 4,2% Ni)	125,6	108,7	327,4
18Х2Н4ВА, закаленная (Fe; 0,2% C; 1,56% Cr; 4,2% Ni; 0,79% W)	105,9	77	308,2—372,5
38ХМЮА, закаленная (Fe; 0,35—0,42% C; 0,17—0,37% Si; 0,3—0,6% Mn; $\leq 0,025\%$ S; $\leq 0,025\%$ P; 1,35—1,65% Cr; $\leq 0,2\%$ Ni; $\leq 0,2\%$ Cu; 0,7—0,11% Al; 0,15—0,25% Mo)	96	81,5	—
38ХВФЮ, закаленная (Fe; 0,35—0,43% C; 0,17—0,37% Si; 0,2—0,4% Mn; $\leq 0,35\%$ S; $\leq 0,35\%$ P)	96	81,5	—
25Х2ГНТА, закаленная (Fe; 0,23—0,29% C; 0,2—0,5% Si; 0,8—1,1% Mn; 1,4—1,8% Cr)	144	129	—
60С2, закаленная и отпущенная (Fe; 0,58% C; 1,66% Si)	42	76,5	—
70С3, закаленная (Fe; 0,72% C; 2,54% Si)	46,9	76	—
60С2Н2А, закаленная (Fe; 0,5% C; 1,37% Si; 1,4% Ni)	40	68,5	—
Ст. 2 (Fe; 0,09—0,15% C; 0,12—0,3% Si; 0,25—0,5% Mn; $\leq 0,05\%$ S; 0,04% P; $\leq 0,3\%$ Ni, Cu; $\leq 0,08\%$ As)	32,5—40,4	20,1—21,1	—
Ст. 3 (Fe; 0,14—0,22% C; 0,12—0,3% Si; 0,4—0,65% Mn; $\leq 0,5\%$ S; 0,04% P; $\leq 0,3\%$ Ni; Cu; $\leq 0,08\%$ As)	38,4—48,2	22—24	—
Ст. 5 (Fe; 0,21—0,37% C; 0,05—0,35% Si; 0,5—0,8% Mn; $\leq 0,05\%$ S; $\leq 0,04\%$ P; $\leq 0,3\%$ Cr, Ni; $\leq 0,08\%$ As)	48—59,5	27,8—25,9	—

Упругие свойства мартенситиостаревших сталей [11]

Таблица 4.3

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{\text{вр}}, 10^7 \text{ н/м}^2$	$\sigma_{\text{т}}, 10^7 \text{ н/м}^2$	$H_B, 10^3 \text{ н/м}^2$
Н12М10К15 (Fe; 12,2% Ni; 14,1% Co; 10% Mo): закаленная и состаренная	250	245	—
кованая и состаренная	250	245	—
Н12К12М7В7 (Fe; 11,9% Ni; 12% Co; 7,8% Mo; 6,7% W), закаленная и состаренная	255	—	—
Н12М10К12ТЮ (Fe; 12,3% Ni; 9,6% Mo; 12% Co; 0,79% Ti; 0,94% Al), кованая и состаренная	294	289	—

4.3. СПЛАВЫ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Таблица 4.4

Упругие свойства сплавов алюминия

Для алюминиевых сплавов различных марок $E = (6,9 \div 7,1) \cdot 10^{10}$ н/м²; $G = (2,6 \div 2,7) \cdot 10^{10}$ н/м²; $\mu = 0,3 \div 0,33$ [7, 18]

Марка	Состав, вес. %	Состояние	$\sigma_{вр} \cdot 10^2$ н/м ²	$\sigma_T \cdot 10^2$ н/м ²	$H_B \cdot 10^2$ н/м ²
АМц	Al; 1,0—1,6% Mn	Нагартованный Полунагартованный Отожженный	21,5 12,7 12,7	37,12 — 4,9	53,9 39,2 29,4
АМг	Al; 0,15—0,4% Mn; 2,0—2,8% Mg	Полунагартованный Отожженный (АМгМ)	24,5 18,6	20,6 9,8	58,8 44,1
АМг5П	Al; 0,2—0,6% Mn; 4,7—5,7% Mg	Отожженный (АМг5ПМ)	26,4	14,7	68,5
АМг3	Al; 0,3—0,6% Mn; 3,2—3,8% Mg; 0,5—0,8% Si	Полунагартованный (АМг3П) Отожженный (АМг3М)	24,5 19,6	17,5 9,8	68,5 49
АМг5	Al; 0,3—0,6% Mn; 4,0—0,5% Mg	Полунагартованный (АМг5П) Отожженный (АМг5М)	29,4 25,4	19,6 13,7	78,3 63,7
АМг7	Al; 0,3—0,6% Mn; 6,0—7,5% Mg	Полунагартованный (АМг7П) Отожженный (АМг7М)	36,2 31,3	24,5 16,6	93 78,3
Д1 Д1П	Al; 3,8—4,8% Cu; 0,4—0,8% Mn; 0,4—0,8% Mg	Закаленный и естествен- но состаренный (Д1Т) Отожженный (Д1М)	41,1 20,5	23,5 10,8	110,4 44,1
Д6	Al; 4,6—5,2% Cu; 0,5—1,0%; Mn; 0,65—1,0% Mg	Закаленный и естествен- но состаренный (Д6Т) Отожженный (Д6М)	45 21,5	29,4 10,8	— —
Д16	Al; 3,8—4,9% Cu; 0,3—0,9% Mn; 1,2—1,8% Mg	Плакированные листы, закаленные и естественно состаренные Плакированные листы, отожженные	41,1 27,3	17,63 9,8	102,7 48,4
ДЗП	Al; 2,6—3,5% Cu; 0,3—0,7% Mn; 0,3—0,7% Mg	Закаленный и естествен- но состаренный (ДЗПТ) Отожженный (ДЗПМ)	33,3 21,2	16,6 7,83	78,3 —
Д18П	Al; 2,2—3,0% Cu; 0,2—0,5% Mg	Закаленный и естествен- но состаренный (Д18ПТ) Отожженный (Д18М)	29,4 15,7	16,6 5,9	68,5 37,2

Марка	Состав, вес. %	Состояние	$\sigma_{\text{вр}}$ 10^2 Н/мм^2	$\sigma_{\text{т}}$ 10^2 Н/мм^2	H_B 10^2 Н/мм^2
AB	Al; 0,2—0,6% Cu; 0,15—0,35% Mn; 0,45—0,9% Mg; 0,5—1,2% Si	Закаленный и естествен- но состаренный Закаленный (ABT) Отжженный (ABM)	32,4	27,5	93
			21,5	11,7	63,6
			17,7	—	29,4
AK2	Al; 3,5—4,5% Cu; 0,4—0,8% Mg; 0,5—1,0% Si; 1,8—2,8% Ni; 0,5—1,0% Fe	Закаленный	41,1	27,4	112,6
AK4	Al; 1,9—2,5% Cu; 1,4—1,8% Mg; 0,5—1,2% Si; 1,0—1,5% Fe; 1,2—1,6% Ni	Искусственно состаренный	43,1	26,4	117,5
AK4-1	Al; 1,9—2,5% Cu; 1,4—1,8% Mg; 1,0—1,5% Ni; 1,0—1,5% Fe	—	43,1	—	117,5
AK6	Al; 1,8—2,6% Cu; 0,4—1,0% Mn; 0,4—0,8% Mg; 0,7—1,2% Si	—	41,1	29,4	102,8
AK8	Al; 0,4—1,0% Mn; 0,4—0,8% Mg; 3,9—4,8% Cu; 0,6—1,2% Si	—	48	37,2	132,2
B-92	Al; 4,5% Mg; 3,3% Zn	Закаленный и состаренный	43,6— 51,3	28,7— 45,2	—
B-92u	Al; 3,2% Zn; 4,1% Mg; 0,7% Mn; 0,1% Zr	То же	44,5	28,7	—
B-95	Al; 1,4—2,0% Cu; 0,4—1,0% Mn; 1,8—2,8% Mg; 5,0—7,0% Zn; 0,1—0,25% Cr	»	53,9	45	146,9
B-96	Al; 8,5% Zn; 2,7% Mg; 2,3% Cu	»	67	63,2	—
B65	Al; 3,9—4,5% Cu; 0,3—0,5% Mn; 0,15—0,3% Mg	Закаленный и естествен- но состаренный	39,2	—	—
ВД17	Al; 2,6—3,2% Cu; 0,45—0,7% Mn; 2,0—2,2% Mg	Закаленный и искус- ственно состаренный	43,1	29,4	112,6
Д20	Al; 6—7% Cu; 0,4—0,8% Mn; 0,1—0,2% Ti	То же	41,1	29,4	—

Марка	Состав, вес. %	Состояние	$\sigma_{вр}$, 10 ⁷ н/м ²	σ_T , 10 ⁷ н/м ²	НВ, 10 ² н/м ²
АЛ1	Al; 1,25—1,75% Mg; 3,75—5,0% Cu;	Закаленный и частич- но состаренный	25,4	—	97,9
АЛ2	1,75—2,25% Ni; Al; 10—13% Si		21,5	—	53,8
АЛ3	Al; 0,2—0,8% Mg; 1,5—3,5% Cu; 4,0—6,0% Si; 0,2—0,8% Mn	Закаленный и частич- но состаренный	27,4	—	77,4
АЛ3В	Al; 0,35—0,5% Mg; 1,5—3,5% Cu; 4,0—6,0% Si; 0,2—0,8% Mn	То же	28,4	—	117,5
АЛ4	Al; 0,17—0,3% Mg; 8,0—15,0% Si; 0,25—0,5% Mn	Закаленный и пол- ностью состаренный	26,4	—	68,5
АЛ4В	Al; 0,2—0,4% Mg; 8,0—11,0% Si; 0,2—0,5% Mn	То же	21,5	—	122,4
АЛ5	Al; 0,35—0,6% Mg; 1,0—1,5% Cu; 4,5—5,5% Si	Закаленный и частич- но состаренный	26,4	—	88,1
АЛ6	Al; 2,0—3,0% Cu; 4,5—6,0% Si	То же	27,5	—	93
АЛ7В	Al; 3,0—5,0% Cu	»	29,4	—	88,1
АЛ8	Al; 9,5—11,5% Mg	Закаленный	32,4	—	78,3
АЛ9	Al; 0,2—0,4% Mg; 6,0—8,0% Si	Закаленный и частич- но состаренный	27,5	—	88,1
АЛ9В	Al; 0,2—0,5% Mg; 6,0—8,0% Si	То же	28,4	—	112,6
АЛ10В	Al; 0,2—0,5% Mg; 5,0—8,0% Cu; 4,0—6,0% Si	Закаленный и полно- стью состаренный	27,5	—	122,4
АЛ11	Al; 0,1—0,3% Mg; 6,0—8,0% Si; 10—14% Zn	—	22,6	—	88,1
АЛ12	Al; 9,0—11,0% Cu	Закаленный и пол- ностью состаренный	19,6	—	—

Марка	Состав, вес. %	Состояние	$\sigma_{вр}$, 10 ⁷ Н/м ²	σ_T , 10 ⁷ Н/м ²	HВ, 10 ⁷ Н/м ²
АЛ13	Al; 4,5—5,5% Mg; 0,8—1,3% Si; 0,1—0,4% Mn	—	19,6	—	87,7
АЛ14В	Al; 0,2—0,4% Mg; 1,5—3,0% Cu; 6,0—8,0% Si; 0,2—0,6% Mn	Закаленный и час- тично состаренный	29,4	—	117,5
АЛ15В	Al; 3,5—5,0% Cu; 3,0—5,0% Si; 1,3% Fe	То же	27,5	—	117,5
АЛ16В	Al; 2,0—4,0% Cu; 3,0—5,0% Si; 0,2—0,5% Mn; 2,0—4,0% Zn; 1,1% Fe	»	26,4	—	127,3
АЛ18В	Al; 7,9—9,5% Cu; 1,5—2,5% Si; 0,2—0,8% Mn; 1,1—1,8% Fe	»	20,5	—	112,6
AlCoA 132	Al; 0,1—1,3% Mg; 0,5—1,5% Cu; 11,0—13,0% Si; 2,0—3,0% Ni	»	29,4	—	122,4
RR-50	Al; 0,05—0,2% Mg; 0,8—2,0% Cu; 1,5—2,8% Si; 0,8—1,7% Ni; 1,4% Fe; 0,05—0,3% Ti + Nb	Состаренный	20,5	—	73,4
RR53В	Al; 0,65—0,9% Mg; 1,4—1,65% Cu; 0,6—0,8% Si; 1,0—1,4% Ni; 0,8—1,3% Fe; 0,16—0,83% Ti + Nb	Закаленный и пол- ностью состаренный	34,3	—	127,3
АЛ17В	Al; 1,5—3,5% Cu; 3,0—5,0% Si; 0,7—0,6% Mn; 4,0—7,0% Zn; 1,1% Fe	Закаленный и частич- но состаренный	26,4	—	127,3
ACC-6-5	Al; 5—6% Sb; 4—5% Pb; 0,5—0,7% Mg	Литой в кокиль Прокатанный и ото- жженный	7,93 7,93	— —	30,7 29,9
АСМ	Al; 3,5—5% Sb; 0,5—0,7% Mg; ≤ 0,5% Si + Fe	Прокатанный и ото- жженный	8,23	—	28
АН-2,5	Al; 2,7—3,4% Ni	Литой в кокиль То же	13,7 15,6	— —	34,3 68,5
AlCoA 750	Al; 1,0% Ni; 1,0% Cu; 6,5% Sn	» Холоднокатанный	15,2 15,8	— —	44,1 49
ХА750	Al; 0,5% Ni; 1,0% Cu; 2,5% Si; 6,5% Sn	Литой в кокиль Литой в кокиль и термообработанный	15,2 20,6	6,85 13,8	9,8 4,9

Марка	Состав, вес. %	Состояние	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м^2	σ_T , 10^7 н/м^2	H_B , 10^7 н/м^2
XB750	Al; 0,8% Mg; 1,2% Ni; 2,0% Cu; 6,5% Sn	Литой в кокиль и термообработанный	20,6	13,7	71,4
XB80S	Al; 0,5% Ni; 1,0% Cu; 6,5% Sn; 1,5% Si	Холоднокатанный Холоднокатанный и отожженный	17,6 14,8	16,2 5,6	68,5 93,0
Al— 30% Sn	Al; 0—3,0% Cu; 25—30% Sn	Холоднодеформированный и отожженный	8,7—6,9	2,0	21,2— 26,4

Упругие свойства сплавов меди [7,8]

Таблица 4.5

Марка	Состав, вес. %	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м^2	σ_T , 10^7 н/м^2	H_B , 10^7 н/м^2	E , 10^{10} н/м^2
ЛА 67-2,5	66—68% Cu; 2—3% Al; Zn	30,6—40,8	—	91,8	—
ЛАЖМц 66-6-3-2	64—68% Cu; 6—7% Al; 2—4% Fe; 1,5—2,0% Mn; Zn	66,3	—	163,2	—
ЛАЖ 60-1-1	58—61% Cu; 1,5—2,0% Al; 0,2—0,7% Si; 0,75—1,5% Fe; 0,1—0,6% Mn; Zn	40,8	25,5	91,8	—
ЛК80-3Л	79—81% Cu; 2,5—4,5% Si; Zn	30,6—46,9	16,3	96,9—112,2	—
ЛКС 80-3-3	79—81% Cu; 2,5—4,5% Si; 2—4% Pb; Zn	30,6—40,8	14,3	91,8—100,2	—
ЛМцГ 58-2-2	57—60% Cu; 1,5—2,5% Mn; 1,5—2,5% Pb; Zn	30,6—40,8	24,5	31,4—91,8	—
ЛМцОС 58-2-2-2	56—60% Cu; 1,5—2,5% Mn; 1,5—2,5% Sn; 0,5—2,5% Pb; Zn	30,6	—	91,8—100,2	—

Марка	Состав, вес. %	$\sigma_{вр}$, 10^2 Н/мм^2	σ_T , 10^2 Н/мм^2	H_B , 10^2 Н/мм^2	E , 10^{10} Н/мм^2
ЛМцЖ 52-4-1	53—58% Cu; 0,5—1,5% Fe; 3—4% Mn; Zn	51	30,6	100,2—142,8	—
ЛМцЖ 55-2-7	50—55% Cu; 0,5—1,5% Fe; 4—5% Mn; Zn	51	—	91,8—122,4	—
ЛС-59-1Л	57—61% Cu; 0,8—1,9% Sb; Zn	20,4—42,8	15,3	91,6—91,8	—
ЛНМцЖА 60-1-2-1-1	58—62% Cu; 0,5—1,5% Al; 0,5—1,1% Fe; 1,5—2,5% Mn; Zn	40,8—48,9	18,4—20,4	100,2—112,2	—
ПМц-48	48% Cu; Zn	21,4	—	133	—
ПМц-54	54% Cu; Zn	35,7	—	130,6	—
Бр. ОФ 10-1 (литье в кокиль)	Cu; 9—11% Sn; 0,8—1,2% P	25,6—35,7	20,4	91,8—122,4	10,5
Бр. ОЦ 10-2 (литье в кокиль)	Cu; 9—11% Sn; 2—4% Zn	20,4—25,5	—	91,8—107,1	10,2
Бр. ОЦН 5-2-5 (литье в кокиль)	Cu; 4,5—5,5 Sn; 1—3% Zn; 4,5—5,5% Ni	35,7	13,4	81,6	—
Бр. ОНС 11-4-3 (литье в кокиль)	Cu; 10—22% Sn; 3% Pb; 4% Ni	20,4—28,6	18,4	—	—
Бр. ОЦС 6-6-3 (литье в кокиль)	Cu; 5,0—6,0% Sn; 5,0—7,0% Zn; 4,0—6,0% Pb	18,4—25,5	8,16—10,2	66,3—76,5	9,18
Бр. ОЦС 5-5-5 (литье в кокиль)	Cu; 4,0—6,0 Sn; 4,0—6,0% Zn; 4,0—6,0% Pb	20,4—25,5	8,16—10,2	61,2—76,5	9,18

Марка	Состав, вес. %	$\sigma_{\text{вд}},$ 10^2 н/мм^2	$\sigma_{\text{т}},$ 10^2 н/мм^2	$H_B,$ 10^2 н/мм^2	$E,$ 10^{10} н/мм^2
Бр. ОЦН 3-7-5-1 (литье в кокиль)	Cu; 2,5—4,5% Sn; 6,0—9,5% Zn; 3,0—6,0% Pb; 0,5—1,5% Ni	21,4	—	61,2	—
Бр. ОЦС 3-12-5 (литье в кокиль)	Cu; 2,0—4,0% Sn; 8,0—15,0% Zn; 3,0—6,0% Pb	21,4	—	61,2	—
Бр. ОФ 6,5-0,4: мягкая твердая	Cu; 6—7% Sn; 0,3—0,4% P	35,7—45,9 71,4—81,6	20,4—25,5 60,2—66,3	71,4—91,8 163,2—204	— —
Бр. ОФ 4-0,25: мягкая твердая	Cu; 3,5—4% Sn; 0,25% P	34,7 61,2	— 35,7	56,1—71,4 163,2—173,4	10,2 10,2
Бр. ОЦ 4-3: мягкая твердая	Cu; 3,5—4% Sn; 2,7—3,3% Zn	35,7 56,1	— —	61,2 163,2	— 12,65
Бр. ОЦС 4-4-2,5: мягкая твердая	Cu; 3—5% Sn; 3—5% Zn; 1,5—2,5% Pb	80,6—35,7 56,1—64,3	12,9 28,6	61,2 163,2—183,6	— —
Бр. ОФ 7-0,2 мягкая	Cu; 6—8% Sn; 0,1—0,25% P	35,7	23,5	76,5	11,0
Бр. ОЦС 4-4-4 мягкая	Cu; 3,5—4,5% Sn; 4% Zn; 2% Pb	31,6	13,3	63,2	—
Бр. А5: мягкая твердая	Cu; 4—6% Al	38,7 81,6	16,3 51	61,2 200,4	10,2 11,2
Бр. А7: мягкая твердая	Cu; 6—8% Al	42,8 102	— —	71,4 157,1	— 11,7—13,3

Марка	Состав, вес. %	$\sigma_{\text{вр}}'$ 10^2 Н/мм^2	$\sigma_{\text{т}}$ 10^2 Н/мм^2	H_B 10^2 Н/мм^2	E , 10^{10} Н/мм^2
Бр. АЖ 9-4: мягкая твердая	Cu; 8—10% Al; 2—4% Fe	56,1 61,2	22,4 25,7	112,2 163,2—204	11,4 11,8
Бр. АЖН 10-4-4: мягкая твердая	Cu; 9,5—11% Al; 3,5—5,5% Fe; 3,5—5,5% Ni	61,2 78,5	— —	141,8—163,3 289,5	— 13,3
Бр. АМЦ 9-2: мягкая твердая	Cu; 8—10% Al; 1,5—2,5% Mn	40,8 61,2	30,6 51	163,2 —	— —
Бр. АЖНЦ 10-3-1,5: мягкая твердая	Cu; 9—11% Al; 2—4% Fe; 1—2% Mn	40 62,2	— 50	— —	— —
Бр. Мц5: литая мягкая твердая	Cu; 4,5—5% Mn	28,5 30,6 61,2	15,3 — 51	71,4 81,6 163,2	10,7 — —
Бр. Б2: литая мягкая твердая	Cu; 0,2—0,5% Ni; 1,9—2,2% Be	51 51 132,6—142,8	— 25,5—35,7 130,6	142,8 119,3 357	— 11,9 13,5—14,4
МНЖ 5-1: мягкий твердый	Cu; 5—6,5% Ni + Co; 1,0—1,4% Fe; 0,3—0,8% Mn	24,5—28,6 ^a 45,9—51 ^b	— —	35,7—51 112,2—122,4	— —
МНА 13-3: мягкий твердый	Cu; 12—15% Ni + Co; 2,3—3% Al	71,4 ^c 91,8—10,2 ^e	— —	76,5 ^d 255—275,4 ^e	— —
МНА 6-1,5: мягкий твердый	Cu; 5,5—6,5% Ni + Co; 1,5—1,8% Al	36,7 ^d 66,3 ^e	— —	61,2—71,4 204 ^e	— —
МНЦ 15-20: мягкий твердый	Cu; 13,5—16,5% Ni + Co; 18—22% Zn	40,8 68,3	— —	71,4 168,3	12,8 12,8
МНцС 17-18-1,8: мягкий твердый	61—64,9% Cu; 16,5—18,0% Ni + Co; 1,6—2,0% Pb; Zn	40,8 66,3	— —	— —	12,9 12,9

Марка	Состав, вес. %	$\sigma_{вр}^*$ 10^7 н/м^2	$\sigma_{т}^*$ 10^7 н/м^2	$HВ$ 10^2 н/м^2	E 10^{10} н/м^2
МН 19: мягкий твердый	Cu; 18—20% Ni + Co	35,7 56,1	— —	71,4 122,4	14,3 14,3
МНЖМц: 30-0,8-1: мягкий твердый	Cu; 29—30% Ni + Co; 0,6—1,0% Fe; 0,8—1,3% Mn	38,8 61,2	— —	71,4 193,6	15,7 15,7
ТП: мягкий твердый	Cu; 0,57—0,63% Ni + Co	88,6 38,7	— —	51—61,2 —	12,2 12,2
ТБ: мягкий твердый	Cu; 15,3—16,3% Ni + Co	32,6 56,1	— —	71,4 122,4	7,9 8,5
МНМц 3-12; мягкий твердый	Cu; 2,5—3,5% Ni + Co; 11,5—13,5% Mn	43,9 86,7	— —	122,4 —	12,9 12,9
МНМц 43-1,5: мягкий твердый	Cu; 39—41% Ni + Co; 1—2 %Mn	45,9 66,3	— —	81,6 159,1	16,9 16,9
МНМц 43-0,5: мягкий твердый	Cu; 42,5—44% Ni + Co; 0,1—1,2% Mn	40,8 66,3	— —	86,7 178,5	12,2 12,2

a — отожженный; *b* — деформированный на 50%; *c* — прессованный; *d* — закаленный при 900°C; *e* — отожженный при 500°C после закалки при 900°C.

Таблица 4.6

Упругие свойства сплавов никеля, кобальта и свинца [7, 8]

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{вр}^*$ 10^7 н/м^2	$\sigma_{т}^*$ 10^7 н/м^2	$HВ$ 10^2 н/м^2	E 10^{10} н/м^2
НМц 2,5, отожженный (Ni + Co; 2,3—3,3% Mn)	45,9—51	16,8—22,4	—	21,4
МШ2, закаленный и состаренный (Pb; 14—16% Sb; 2,7—3,3% As)	—	—	43,9—46,9	—
МСМ1, закаленный и состаренный (Pb; 9,5—10,5% Sb; 2,0—2,5% As)	—	—	35,7—40,8	—

Упругие свойства сплавов олова [7, 8]

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{\text{вр}} \cdot 10^7 \text{ н/м}^2$	$\sigma_{\text{т}} \cdot 10^7 \text{ н/м}^2$	$H_{\text{Б}} \cdot 10^7 \text{ н/м}^2$	$E \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2$
Б83 (Sn; 10—12% Sb; 5,5—6,5% Cu)	9,18	6,83	30,6	4,9
Б89 (Sn; 7,25—8,25% Sb; 2,5—3,5% Cu)	8,16	6,32	24,79	5,81
Б91 (Sn; 4,5% Sb; 4,5% Cu)	8,16	—	22,4	—
Б93 (Sn; 3,5% Sb; 3,5% Cu)	6,83	5,4	14,28	—
Б93А (Sn; 5,0% Sb; 2,0% Cu)	6,0	4,89	16,42	—
БС6 (Pb; 5,5—6,5% Sb; 5,5—6,55% Cu)	6,83	—	17,24	—
Б6 (Pb; 5,0—6,0 Sn; 14—16% Sb; 2,5—3,0 Cu)	6,93	—	32,64	—
БТ (Pb; 9,0—11,0% Sn; 14—16% Sb; 0,7—1,1% Cu)	6,12	5,92	—	—
БН (Pb; 9,0—11,0% Sn; 13—15% Sb; 1,5—2,0% Cu)	7,14	6,12	29,58	—
Б16 (Pb; 15—17% Sn; 15—17% Sb; 1,5—7,0% Cu)	7,96	—	30,6	—
БС (Pb; 16—18% Sb; 1,0—1,5% Cu)	4,28	—	20,4	—
БК2 (Pb; 1,5—2,5% Sn)	9,49	—	20,09	—
Сатко II (Pb; 1,0—2,0% Sn)	7,85	—	27,54	—
БК (Pb; $\leq 0,25$ Sb)	10,2	—	32,64	2,24
Л 199 (57—91,1% Sn; 8,9% Zn; 43% Fe)	7,65	—	14,28	—
Л 183 (60—71% Sn; 30—38,1% Pb; 5,0% Zn)	5,3	—	12,85	—
Л 145 (44,8% Sn; 32,0% Pb; 18,2% Cd)	6,83	—	15,61	—
Л 141 (67—75% Sn; 32,25% Pb)	6,93	—	23,77	—
Л 130 (52% Sn; 30% Pb; 13% Cd)	7,75	—	30,6	—

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{вр}^*$ 10^2 Н/мм^2	σ_T^* 10^2 Н/мм^2	H_B 10^2 Н/мм^2	E 10^{10} Н/мм^2
ПОС 90 (89—90% Sn; $\leq 0,15\%$ Sb; Pb)	4,39	—	13,26	—
ПОС 50 (49,5% Sn; $\leq 0,8\%$ Sb; Pb)	3,88	—	15,2	—
ПОС 25	2,86	—	10,71	—
ПОС 20 (18—20% Sn; $\leq 0,3\%$ Sb; 80—82% Pb)	2,74	—	10,2	—
ПОС 10	3,26	—	11,02	—
ПОСС 5-3 (4,5—5,5% Sn; 2—3% Sb; 92% Pb)	10,81	—	9,89	—
ПСр 2,5 (5,0—6,0% Sn; 2,2—2,8% Ag; 83—91% Pb);	11,22	—	—	—
ПОЦ 60 (60% Sn; 40% Zn)	7,24	5,71	19,04	—
ПСР 1,5А (0,75—1,25% Sn; 1,3—1,7% Ag; $\leq 0,4\%$ Sb; 97,5% Pb)	3,37	—	23,15	—
ПСР 2,5 А (0,25% Sn; 2,3—2,7% Ag; $\leq 0,4\%$ Sb; 97,5% Pb)	3,16	—	9,38	—

Таблица 4.8

Упругие свойства сплавов титана [7, 8, 12, 13]

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{вр}^*$ 10^2 Н/мм^2	σ_T^* 10^2 Н/мм^2	H_B 10^2 Н/мм^2	E , 10^{10} Н/мм^2	G , 10^{10} Н/мм^2	ν
BT3 (Ti; 4—6,2% Al; 2—3% Cr)	96,9—117,3	86,7—107,1	27,5—36,7*	11,2	4,33	0,3
BT3-1 (Ti; 4—6,2% Al; 1,5—2,5% Cr; 1—2,8% Mo)	96,9—122,4	86,7—112,2	27,5—36,7*	11,7	4,39	0,3
BT4 (Ti; 4—5% Al; 1—2% Mn)	81,6—91,8	71,4—81,6	—	11,2—12,2	4,28	0,31
OT4 (Ti; 2—3,5% Al; 1—2% Mn)	71,4—86,7	56,1—66,3	61,2—71,4*	11,2—12,2	4,08	—
BT5 (Ti; 5,5% Al)	81,6—96,9	71,4—86,7	—	10,6	4,33	0,3
BT6 (Ti; 5,0—6,5% Al; 3,5—4,5% V)	91,8—102	81,6—91,8	326,4—367,2	11,5	—	—
BT8 (Ti; 5,8—6,8% Al; 2,8—3,8% Mo)	107,1—120,4	96,9—112,2	316,2—357	11,2	4,33	0,3
BT9, закаленный и состаренный (Ti; 2,8—3,8% Mo; 5,8—6,8% Al; 1,8—2,8% Sn)	112—127	98—113	—	—	—	—
BT10, отожженный (Ti; 5—6% Al; 2,8—3,5% Cu; 2—3% Sn)	98—115	90—98	—	11,8	—	—
BT14, закаленный и состаренный (Ti; 3,5—4,5% Al; 2,5—3,0% Mo; 0,7—1,5% V)	113—137	106—127	333—363	10,8	—	—
BT15, закаленный и состаренный (Ti; 3—4% Al; 7—8% Mo; 10—11,5% Cr)	133—147	123—142	—	—	—	—

* Твердость по Роквеллу, шкала С.

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{вр} \cdot 10^7 \text{ н/м}^2$	$\sigma_T \cdot 10^7 \text{ н/м}^2$	$H_B \cdot 10^7 \text{ н/м}$	$E \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2$
(Zn; 4% Al; 0,04% Mg)	25,5—30,0	—	71,4—91,8	—
(Zn; 4% Al; 1% Cu; 0,04% Mg)	27,5—33,7	—	81,6—102	—
(Zn; 4% Al; 3% Cu; 0,05% Mg)	32,6—38,8	—	81,6—122,4	—
ЦАМ 10-5 (Zn; 9—12% Al; 4—4,5% Cu; 0,3—0,06% Mg)	30,6	—	102	—
ЦАМ 9-1,5 (Zn; 8—11% Al; 1,0—2,0% Cu; 0,03—0,06% Mg)	30,6	—	96,9	—
ЦАМ-1 (Zn; 0,8—1,2% Cu)	20,4—30,6	—	45,9—76,5	—
ЦАМ 0,2—4 (Zn; 0,2—0,25% Al; 3,5—4,5% Cu)	30,6—36,7	—	76,5—91,8	12,8
ЦАМ 4-1 (Zn; 3,7—4,3% Al; 0,6—1,0% Cu; 0,02—0,05% Mg)	37,7—44,9	—	91,8—107,1	13,3
ЦАМ 10-1 (Zn; 9—11% Al; 0,6—1,0% Cu; 0,02—0,05% Mg)	40,8—46,9	—	91,8—112,2	13,3
ЦАМ 10-5 (Zn; 9—11% Al; 4,5—5,5% Cu)	35,7—45,9	—	91,8—112,2	—
ЦА 15 (Zn; 14—16% Al; 0,04% Mg)	25,5—40,8	—	61,2—102	11,5

Упругие свойства сплавов платины [7, 8]

Таблица 4.10

Сплав (состав, вес. %)	Состояние	$\sigma_{вр} \cdot 10^7 \text{ н/м}^2$	$\sigma_T \cdot 10^7 \text{ н/м}^2$	$H_B \cdot 10^7 \text{ н/м}^2$
96,5% Pt; 3,5% Rh	Наклепанный	42,8	—	132,6
	Отожженный	17,8	—	71,4
90% Pt; 10% Rh	Наклепанный	64,3	—	168,3
	Отожженный	32,1	—	91,8
80% Pt; 20% Rh	Наклепанный	92,8	—	214,2
	Отожженный	49,9	—	122,4
95% Pt; 5% Ir	Холоднообработанный	50	—	142,8
	Отожженный	28,6	—	91,9
90% Pt; 10% Ir	Холоднообработанный	64,3	—	189,7
	Отожженный	39,3	—	132,6
80% Pt; 20% Ir	Холоднообработанный	103,5	—	270,3
	Отожженный	71,5	—	204
70% Pt; 30% Ir	Холоднообработанный	143	—	285,6
	Отожженный	114,2	—	265,2
95% Pt; 5% Au	Наклепанный	45,4	—	158,1
	Отожженный	32,1	—	93,8
90% Pt; 10% Au	Наклепанный	64,3	—	226,4
	Отожженный	55,4	—	145,9
30% Pt; 70% Au	»	46,4	—	137,7
10% Pt; 90% Au	»	25,7	—	61,2
90,92% Au; 9,08% Cu	»	56,5	—	—

Упругие свойства сплавов вольфрама [7, 8]

Таблица 4.11

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{вр} \cdot 10^7 \text{ н/м}^2$	$\sigma_T \cdot 10^7 \text{ н/м}^2$	$H_R \cdot 10^7 \text{ н/м}^2$
В2К (47—63% Co; 27—33% Cr; 13—17% W; $\leq 2\%$ Ni; $\leq 2\%$ Fe; 1—2% Si; 1,0% Mn; 1,8—2,5% C)	61,2—71,4	—	45,9—47,9
ВЭК (58—62% Co; 28—32% Cr; 4—5% W; $\leq 2\%$ Ni; $\leq 2\%$ Fe; 2,5% Si; 1,0—2,5% C)	61,2—71,4	—	40,8—42,8

Упругие свойства металлокерамических твердых сплавов [7, 8]

Сплав (состав, вес. %)	$\sigma_{\text{в. изг.}} 10^7 \text{ Н/м}^2$	$\sigma_{\text{в. сж.}} 10^7 \text{ Н/м}^2$	$H_{RA} 10^4 \text{ Н/м}^2$	$E, 10^{10} \text{ Н/м}^2$
97% WC; 3% Co	102—122,4	601,8	92,8—94,9	68,9
94% WC; 6% Co	163,2—193,6	510	91,8—92,8	64,3
91% WC; 9% Co	153—193,8	489,6	90,8—91,8	60,2
80% WC; 20% Co	204—244,8	346,8	84,7—87,7	51
70% WC; 30% Co	—	—	81,6—83,6	—
94% WC; 1% TiC; 5% Co	142,8—163,2	571,2	90,8—91,8	64,3
86% WC; 5% TiC; 9% Co	153—163,2	469	90,8—91,8	60,2
82% WC; 10% TiC; 8% Co	153—173,4	—	91,8—92,8	—
78% WC; 16% TiC; 6% Co	112,2—127,5	438,6	91,8—93,3	53
69% WC; 25% TiC; 6% Co	91,8—112,2	—	91,8—92,8	—
34% WC; 60% TiC; 6% Co	71,4—81,6	387,6	93,8—94,9	38,8
85% WC; 4% TiC; 1% TaC (NbC); 10% Co	173,4—193,8	—	90,8—91,8	56,1
80,5% WC; 5% TiC; 5,5% TaC (NbC); 9% Co	173,4—204	—	91,8—92,8	57,1
76% WC; 7,5% TiC; 6,9% TaC (NbC); 10% Co	173,4—204	458	90,8—91,8	53
62% WC; 12% TiC; 18% TaC (NbC); 8% Co	122,4—142,8	520,2	92,8—93,8	64,3
59% WC; 12% TiC; 18% TaC (NbC); 11% Co	132,6—153	408	91,8—92,8	57,1
70,5% WC; 13,5% TiC; 7,5% TaC (NbC); 8,5% Co	132,6—153	479,4	92,8—93,8	51
ВК2 (98% WC; 2% Co)	102	—	91,8	—
ВК3 (97% WC; 3% Co)	102	—	90,8	—
ВК6 (94% WC; 6% Co)	122,4	—	89,8	—
ВК8 (92% WC; 8% Co)	132,6	—	89,3	—
ВК4 (96% WC; 4% Co)	122,4	—	91,3	—
ВК6 мелкозернистый (94% WC; 6% Co)	122,4	—	90,8	—

Таблица 4.13

Упругие свойства биметаллов [7, 8]

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{\text{вр.}} 10^7 \text{ Н/м}^2$	$\sigma_{\text{т.}} 10^7 \text{ Н/м}^2$	$H_B 10^7 \text{ Н/м}^2$	$E, 10^{10} \text{ Н/м}^2$
90/10 (90% Al; 10% Cu):				
мягкий	9,18—11,2	4,08—5,1	34,7—38,8	7,45
твердый	18,4—20,4	13,3—15,3	61,2—65,3	—
5/90/5 (5% Cu; 90% Al; 5% Cu):				
мягкий	9,18—11,2	4,08—5,1	30,6—34,7	7,24
твердый	18,4—20,4	14,3—16,3	61,2—66,3	—
80/20 (20% Cu; 80% Al):				
мягкий	10,2—12,2	4,59—5,61	37,7—41,8	7,65
твердый	19,4—21,4	16,3—18,4	66,3—71,4	—
10/80/10 (10% Cu; 80% Al; 10% Cu):				
мягкий	10,2—12,2	4,59—5,61	32,6—36,7	7,34
твердый	19,4—21,4	16,8—18,4	67,3—71,4	—
70/30 (70% Al; 30% Cu):				
мягкий	12,2—14,3	5,1—6,12	38,8—43,9	8,27
твердый	20,4—23,5	17,3—19,4	71,4—76,5	—
15/70/15 (15% Cu; 70% Al; 15% Cu):				
мягкий	12,2—14,3	5,1—6,12	38,8—42,8	7,55
твердый	30,4—23,5	18,4—20,4	73,4—77,5	—
Д16АМ	23,5—24,5	—	—	—
Д16АТ	42,3—44,4	28,1—28,6	—	—
Д16АТН	44,4—47,4	34,7—35,7	—	—
Д1АМ	23,5—24,5	—	—	—
Д1АТ	37,7—38,8	19,4—20,4	—	—

Упругие и прочностные свойства пластмасс [9, 16]

Наименование	$\sigma_B \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$	$\sigma_B \cdot \text{сж.} \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$	$\sigma_B \cdot \text{изг.} \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$	$H_B \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$	$E \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ (при растяжении)
Аминопласт	3,6	9,8	5,9—7,8	34—54	0,74—0,98
Асбобетонит	6,4—11,7	12,3—30,1	10,8—8,6	29,4—44	1,37—1,96
Винилпласт	3,92—5,88	7,84—15,7	9,8—11,8	14,7—15,7	0,039
Гетинакс электротехнический (П)	7,84	16,2—28,4	9,8	24,5	1,18—2,06
Гранулированный сополимер	3,9	—	8,3	11,8	0,2—0,26 (при изгибе)
Древесно-слоистый пластик ДСП-Б (длинный лист)	21,6	15,2	25,5	24,5	2,9
Древесный коротковолокнистый волокнит К-ФВ25	2,94	12,7	4,9—6,9	26,5	—
Капроновая смола:					
первичная	5,9	7,8	8,8	9,8—11,8	0,098—0,123
вторичная	6,86—7,8	8,8—9,8	9,8	—	0,098—0,123
Капрон стеклонаполненный	14,7—17,6	11,8	20,6—24,5	19,6—21,6	0,74—0,83
Литьевой материал ПУ-1 А и Б	4,9—5,88	7,8—8,3	6,86—7,8	—	—
ЭЦ-12 А	—	—	5,9	9,8	—
Пенопласт плиточный ПВХ-2	0,44—0,45	0,147	—	—	0,016—0,02
Пенопласт ФК-20	0,17	0,098	—	—	—
Полиамид:					
наполненный П-68 Т20	4,9—5,9	9,3—9,8	9,3—9,8	14,7—17,6	0,118—0,196
стеклонаполненный СП-68	7,35—8,3	10,8	12,25—14,7	27,4—29,4	0,78
Поливинилхлорид неориентированный	2,9—4,9	5,15—5,9	3,8—10,8	—	—
Поликапроамид	5,9—6,37	6,7—7,8	8,8	9,8—11,8	—
Поликапроамид стеклонаполненный	12,7—14,7	11,8—12,85	21,6—24,5	19,6—21,6	—
Поликарбонат (дифион)	5,9—8,7	7,8—8,8	7,8	14,7—15,7	0,216—0,245
Поликарбонат стеклонаполненный	12,35—14,75	13,03	17,15—21,95	—	—
Полипропилен ПП-1	2,45	5,9	7,8	6,17	0,066—0,117 (при изгибе)
Полипропилен стеклонаполненный	5,5	4,8	6,9	—	—
Полистирол:					
эмульсионный А	3,4—3,9	9,8	9,8	13,7—14,7	0,255
суспензионный ПС-С	3,9	—	4,9	—	—
стеклонаполненный	7,25—10,3	9,6—11,7	10,3—13,0	—	—
Полиформальдегид стабилизированный	5,9—6,9	12,7	7,8	19,6—39,2	—
Полнэтилен:					
высокого давления кабельный П-2003-5	1,18—1,37	—	0,74	1,18—2,45	0,015—0,025
высокого давления П-2006-Т	1,37	1,23	1,18—1,67	12,7 (по Роквеллу)	2,015—0,025
низкого давления П-4007-Э	2,16	2,45	2,16	4,4—5,7	0,054 (при изгибе)
среднего давления	2,65—3,23	—	2,45—3,9	5,5—6,4	0,078—0,098
Пресс-материал:					
горячего прессования ВЭИ-11	—	—	2,45	—	—
холодного прессования ВЭИ-11	—	—	1,96	—	—
АГ-4НС	88,2	39,2	58,8	—	—
К-41-5	17,15	12,99	4,9	—	—
Сополимер МСН-А	—	8,8—9,8	—	15,7—17,6	—
Сополимер стирола с метилстиролом	—	—	8,8	—	0,304
Стекло органическое ПА, ПБ, ПВ	4,9	11,8—15,7	7,8—13,7	6,9—11,8	0,314—0,392
Стекло текстолит СТЭР-1-30	29,4	29,4	39,2	—	2,45
Текстолит:					
поделочный ПТК	9,8	24,5	15,7	29,4—34,3	0,39—0,63
металлургический	—	19,6	—	29,4	—
графитированный	8,8	19,6	11,8	—	—
Фаолит А	1,7	3,9	4,9	24,5—32,3	—
Фторопласт-3	2,9—3,9	1,96—5,6	5,9—7,8	—	9,8—12,7
Фторопласт-4	2,2	1,18	1,37	2,9—3,9	0,046—0,083 (при $t=60^\circ\text{C}$)
Фторопласт 4Д-Б	1,37	1,96	1,09	2,9—3,9	0,046—0,083 (при $t=60^\circ\text{C}$)

Наименование	$\sigma_B, 10^7 \text{ н/м}^2$	$\sigma_{B, \text{сж}}, 10^7 \text{ н/м}^2$	$\sigma_{B, \text{изг}}, 10^7 \text{ н/м}^2$	$H_B, 10^{10} \text{ н/м}^2$	$E, 10^{10} \text{ н/м}^2$ (при растяжении)
Этрол этилцеллюлозный ЭПТ:					
тропический	2,9	4,4	3,3—3,9	4,4—5,9	0,216
ацетобутиратцеллюлозный АБЦЭ-45-20	1,7—4,6	5,15—14,7	1,47—8,8	3,9—5,9	—
нитроцеллюлозный	2,45—4,9	13,7—19,6	2,9—5,9	5,9—13,7	0,176—0,27
Целлулоид белый технический	3,4	—	4,9	5,9	0,113

Таблица 4.15

Свойства технических резин [7, 8]

Сорт резины	Прочность при растяжении, 10^5 н/м^2	Удлинение при разрушении, %	Твердость, 10^5 н/м^2
Мягкая эластичная	29,4—58,8	200—100	4,4—6,37
Средней твердости и эластичности	44—73,5	300—600	6,86—10,78
Жесткая, упругая	44—98	250—600	11,2—17,4
Теплостойкая, мягкая	44—127,4	300—800	5,1—6,45
Теплостойкая, неэластичная	29,4—78,5	100—200	12,3—17,4
Маслостойкая, средней и твердой эластичности	49—98	350—650	7,25—10,78
Маслостойкая, неэластичная	44—58,8	300—600	11,8—16,3
Маслостойкая, мягкая	74	600—700	4,2—5,7

4.5. МИНЕРАЛЫ И ВОЛОКНА

Таблица 4.16

Твердость минералов [10, 15]

Минерал	Химическая формула	Микротвердость, 10^7 н/м^2	Твердость по шкале Мооса
Азурит	$2 \text{ CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$	—	3,77—3,83
Алмаз (природный, борозол)	C	9859	10
Берилл	$\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$	1121—1458	7,5—8,0
Гранат	$\text{Fe}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$	1203—1264	—
Графит	C	6,8—11,8	1—2
Кварц	SiO_2	1002—1212	7
Корунд	Al_2O_3	2014—2157	9
Опал	$\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	—	5,5—6,5
Топаз	$\text{Al}_2[\text{SiO}_4][\text{FOH}]_2$	1388—1439	8
Турмалин	$[\text{Ni}, \text{Ca}](\text{NaAl})_6[\text{Si}_6\text{Al}_3\text{B}_3 \cdot (\text{O}, \text{OH})_{30}]$	1049—1162	—

Свойства волокон и проволок [14, 15]

Материал	Форма	$\sigma_B \cdot 10^7 \text{ н/м}^2$	$E \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2$	Удлинение, %
Ацетат	Волокно	17,6—21,5	—	25
Бамбук	»	34,5	3,3	—
Вискоза	»	26,5—44	—	15—24
Графит	Усы	2050	98	—
Капрон	Волокно	49—63,5	—	15—35
Лен	»	98	—	2,5—3
Медноаммиак	»	20,5—30,5	—	15
Сталь	Проволока	340	19,6	—
Стекло	Волокно	210	—	—
Нитрон	»	44	—	16—21
Шелк	»	41	—	—
Шерсть	»	15,6—17,2	—	—
В	»	590	50	—
Ве	Проволока	152	29	—
С	Нити	122	4,1	—
W	Проволока	275	40	—
Al_2O_3	Усы	108—1760	41	—
BeO	»	1900	41	—
SiO_2	Волокно	138—148	55	—
WC	Кристаллы	34,5	49—69	—
ZrC	»	41	19	—
TiC	»	31—41	47	—
SiC	Усы	305	45	—
B_4C	»	980	45	—
TiB_2	Кристаллическое волокно	12,8	37—56	—

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Teller W. A Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry. V. 5. Lond. — N. Y. — Toronto, 1942.
2. Кэй Д., Лэби Т. Справочник физика-экспериментатора. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1949.
3. Teller W. A Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry. V. 3. Lond. — N. Y. — Toronto, 1942.
4. Teller W. Ibid. V. 15. Lond — N. Y. — Toronto, 1942.
5. Teller W. A Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry. V. 11. Lond. — N. Y. — Toronto, 1943.
6. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела. Т. 4. Томск, Полнграфиздат, 1947.
7. Справочник по машиностроительным материалам. Под ред. Г. И. Погодина—Алексеева. Т. 2. М., Машгиз, 1959.
8. Справочник конструктора точных приборов. Под ред. И. Я. Левина. М., Машгиз, 1959.
9. Суслов Н. И. Замена металлов пластмассами. М., Машгиз, 1962.
10. Лебедев С. И. Определение микротвердости мннералов. М., Изд-во АН СССР, 1963.
11. Едернол А. Ф., Жуков О. П., Перкас М. Д. Мартенситностареющие стали с прочностью более 200 кг/мм^2 . — «Металловедение и термическая обработка металлов». 1971, № 4, с. 9.
12. Титановые сплавы. Ч. I. М., ОНТИ. ВИАМ, 1959.
13. Толмашов Н. Д., Альтовский Р. М. Коррозия и защита титана. М., «Машиностроение», 1971.
14. Волокнистые композиционные материалы. Пер. с англ. Под ред. Ф. З. Бахштейна. М., «Мир», 1967.
15. Handbook of Chemistry and Physics 35 th edition. Cleveland, Ohio.
16. Альшиц И. Я. Анисимов Н. Ф., Благов Б. Н. Проектирование деталей из пластмасс. Справочник. М., «Машиностроение», 1969.
17. Справочник по машиностроительным материалам. Под ред. Г. И. Погодина—Алексеева. Т. I. М., Машгиз, 1959.
18. Металловедение алюминия и его сплавов. Отв. ред. И. Н. Фридляндер. М., «Металлургия», 1971.

ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВ

5.1. ЭЛЕМЕНТЫ

Таблица 5.1

Плотность чистых элементов ρ , 10^3 кг/м^3 [1—3]

Элемент	t , °C	ρ	Элемент	t , °C	ρ
Алюминий:			Празеодим	20	6,475
твердый	20	2,70	Рений	20	20,53
жидкий	659	2,382	Родий	20	12,44
Барий	20	3,78	Ртуть:	0	13,596
Бериллий	20	1,84	жидкая	20	13,546
Бор:				—38,8	13,690
кристаллический	20	3,33	твердая	—38,8	14,193
аморфный	20	2,34		—188	14,383
Бром жидкий	20	3,12	Рубидий	20	1,532
Ванадий	20	5,96	Рутений	0	12,06
Висмут электролитический	20	9,747	Самарий	20	7,8
Вольфрам	20	18,6—19,1	Свинец:		
Гадолиний	20	5,91	твердый	20	11,342
Гафний	32, 38	6,093		325	11,005
Гафний	20	13,3	жидкий	325	10,645
Германий	20	5,46		400	10,597
Европий	20	3,217		850	10,078
Железо	20	7,87	Селен:		
Золото	20	19,3	аморфный	20	4,8
Индий	20	7,28	кристаллический	20	4,5
Иод	20	4,94	жидкий	—	4,27
Иридий	17	22,42	Сера:		
Иттербий	20	5,5	ромбическая	20	2,07
Иттрий	20	3,80	монокристаллическая	20	1,96
Кадмий	20	8,648	аморфная	20	1,92
Калий	20	0,87	жидкая	113	1,81
твердый	62,1	0,851	Серебро:		
жидкий	62,1	0,83	литое	20	10,42—10,59
Кальций	29	1,55	жидкое	—	9,51
Кобальт	21	8,71	Скандий	20	2,5
Кремний:			Стронций	20	2,54
кристаллический	20	2,42	Сурьма	20	6,618
аморфный	15	2,35	аморфная	20	6,22
Лантан	—	6,15	Таллий	20	11,86
Литий	20	0,534	Тантал	20	16,6
Магний	5	1,741	Теллур:		
Марганец	20	7,42	кристаллический	20	6,25
Медь:			аморфный	20	6,02
твердая	20	8,93	Тербий	20	4,35
жидкая	—	8,217	Титан	18	4,5
Молибден	20	9,01	Торий	20	11,3—11,1
Натрий:			Углерод (алмаз)	20	3,52
твердый	—188	1,0066	Углерод (графит)	20	2,25
	20	0,9712	Уран	13	18,7
	97,6	0,9519	Фосфор:		
жидкий	97,6	0,9287	белый	20	1,83
Неодим	20	6,96	красный	20	2,20
Никель	20	8,6—8,9	металлический	15	2,34
Ниобий	15	8,4	Хром	20	7,1
Олово:			Цезий	20	1,873
белое	20	7,29	Церий	20	6,9
твердое	226	7,184	Цинк:		
жидкое	226	6,99	твердый	20	6,92
серое	20	5,8	жидкий	—	6,48
Осмий	20	22,5	Цирконий	20	6,44
Палладий	20	12,16	Эрбий	20	4,77
Платина	20	21,37			

5.2. ГАЗЫ И ПАРЫ

Плотность газов и паров при 0°C и 760 мм рт. ст., кг/м³ [1—4]

Элемент или соединение	Формула	ρ	Элемент или соединение	Формула	ρ
Азот	N ₂	1,2505	Неон	Ne	0,8999
Аммиак	NH ₃	0,7714	Нитрозил:		
Аргон	Ar	1,7839	фтористый	NOF	2,176*
Ацетилен	C ₂ H ₂	1,1709	хлористый	NOCl	2,992
Бор фтористый	BF ₃	2,99	Озон	O ₃	2,22
n-Бутан	C ₄ H ₁₀	2,703	Окись азота	NO	1,3402
i-Бутан	C ₄ H ₁₀	2,673	Пропан	C ₃ H ₈	2,0037
Водород:	H ₂	0,08987	Пропилен	C ₃ H ₆	1,915
бромистый	HBr	3,664	Радон	Rn	9,73
иодистый	HI	5,789	Сера:		
мышьяковистый	H ₃ As	3,48	двуокись	SO ₂	2,9263
селенистый	H ₂ Se	3,6643	гексафторид	SF ₆	6,50*
сернистый	H ₂ S	1,5392	Силан:		
теллуристый	H ₂ Te	5,81	диметил	SiH ₂ (CH ₃) ₂	2,73
фосфористый	H ₃ P	1,530	метил	SiH ₃ CH ₃	2,08
хлористый	HCl	1,6391	хлористый	SiH ₃ Cl	3,03
Воздух	—	1,2928	трифтористый	SiHF ₃	3,89
Гелий	He	0,1785	Стибин (15°C, 754 мм рт. ст.)	SbH ₃	5,30
Германия тетрагидрид	GeH ₄	3,420	Сульфурил фтористый	SO ₂ F ₂	3,72*
Диметиламин	(CH ₃) ₂ NH	1,966*	Триметиламин	(CH ₃) ₃ N	2,580*
Дифтордихлорметан	CF ₂ Cl ₂	5,510	Триметилбор	(CH ₃) ₃ B	2,52
Дициан	C ₂ N ₂	2,335*	Углерод:		
Закись азота	N ₂ O	1,978	двуокись	CO ₂	1,9768
Кислород	O ₂	1,42904	окись	CO	1,2500
Кремний:			сероокись	COS	2,72
фтористый	SiF ₄	4,9605	Фосфор:		
гексагидрид	Si ₂ H ₆	2,85	фтористый	PF ₃	3,907*
тетрагидрид	SiH ₄	1,44	оксифторид	POF ₃	4,8
Криптон	Kr	3,74	пентафторид	PF ₅	5,81
Ксенон	Xe	5,89	Фтор	F ₂	1,695
Метан	CH ₄	0,7168	Фторокись азота	NO ₂ F	2,90
Метиленхлорид	CH ₂ Cl	2,307	Хлор	Cl ₂	3,22
Метиламин	CH ₅ N	1,388	Хлор:		
Метилловый эфир	C ₂ H ₅ O	2,1098	двуокись	ClO ₂	3,09*
Метилфторид	CH ₃ F	1,545	окись	Cl ₂ O	3,89*
Метилхлорид	CH ₃ Cl	2,307	Хлорокись азота	NO ₂ Cl	2,57
Мышьяк фтористый	AsF ₅	7,71	Этан	C ₂ H ₆	1,356
			Этилен	C ₂ H ₄	1,2605

* При $t = 20^\circ\text{C}$.

Таблица 5.3

Плотность газов в жидком и твердом состояниях, 10³ кг/м³ [1,5]

Газ	Жидкое		Твердое	
	$t, ^\circ\text{C}$	ρ	$t, ^\circ\text{C}$	ρ
Азот	-195,09	0,8043	-253	1,03
Азота окись	-20	1,0	—	—
Аммиак	-10,7	0,65	—	—
»	+16,3	0,61	—	—
Аргон	-183,15	1,3739	-233	1,65
Ацетилен	-23,5	0,52	—	—
Водород:	-249,89	0,0672	-260	0,076
сернистый	-61	0,86	—	—
фосфористый	-90	0,746	—	—
фтористый	+13,6	0,988	—	—
хлористый	-85,8	1,194	—	—
Воздух (20,99 O ₂)	-147	0,92	—	—
Гелий	-268,38	0,1139	—	—
Криптон	-147,18	2,3707	—	—
Ксенон	-109,1	3,06	—	—

Газ	Жидкое		Твердое	
	$t, ^\circ\text{C}$	ρ	$t, ^\circ\text{C}$	ρ
Кислород	-182,7	1,14	-253	1,41
	-205	1,25	—	—
Метан	-164	0,415	—	—
Метилхлорид	+18	0,920	—	—
Неон	-245,9	1,204	—	—
Озон	-183	1,71	—	—
Серы двуокись	-10	1,46	—	—
Углерод:				
двуокись	-60	1,19	-79	1,53
окись	-190	0,79	—	—
Фтор	-187	1,11	—	—
Хлор	-33,6	1,56	—	—
	+20	1,41	—	—
Этан	-88	0,546	—	—
Этилен	-102	5,566	—	—
	-21	0,41	—	—

5.3. ЖИДКОСТИ

Таблица 5.4

Плотность жидкостей, 10^3 кг/м^3 [1—4]

Жидкость	$t, ^\circ\text{C}$	ρ	Жидкость	$t, ^\circ\text{C}$	ρ
Ацетон	20	0,792	Пентан	20	0,626
Бензин	20	0,68—0,72	Ртуть	0	13,596
Бензол	0	0,899	Спирт амиловый	20	0,814
Вода	4	1,00	Спирт:		
Глицерин	20	1,26	бутиловый	20	0,80978
Керосин	20	0,82	изобутиловый	20	0,8011
2-Ксилол	20	0,88	изопропиловый	20	0,7854
Кислота:			пропиловый	20	0,8044
азотная	20	1,502	метиловый	20	0,7928
пальмитиновая	62	0,853	этиловый	20	0,7893
уксусная	20	1,049	Сероуглерод	0	1,293
Масло:			Углерод четыре хлористый	20	1,595
назелиновое	20	0,8	Фторбензол	20	1,024
креозот	15	1,04—1,10	Хлорбензол	20	1,066
машинное	20	0,90—0,92	Хлороформ	20	1,489
парафиновое	20	0,87—88	Эфир	0	0,736
скипидарное	20	0,87	Этилацетат	20	0,901
Метилацетат	25	0,9274	Этилбромид	20	1,430
Молоко	20	1,03	Этилодид	20	1,933
Морская вода	20	1,01—1,05	Этилхлорид	0	0,9214
Нефть	20	0,81—0,85			

Таблица 5.5

Плотность масел и воска при 15°C по отношению к плотности воды при 15°C [3, 4]

Вещество	ρ	Вещество	ρ
Воск:		Жир:	
китайский	0,809—0,811	китовый	0,917—0,924
обыкновенный	0,961—0,968	кроличий	0,934—0,936
миртовый	0,995	костный	0,914—0,916
японский	0,970—0,980	конский	0,919—0,933
Жир:		свиной (лярд)	0,913—0,915
бараний	0,937—0,953	свиной (жировая ткань)	0,934—0,938
говяжий	0,931—0,938	спермацет	0,905—0,945
гусиный	0,923—0,930	тресковой печени	0,964—0,974
дельфина	0,926	тюлений	0,915—0,926
кашалота	0,878—0,884	человеческий	0,9178

Вещество	ρ	Вещество	ρ
Масло:		Масло:	
букового ореха	0,922	маковое	0,924—0,926
виноградных зерен	0,917—33	миндальное	0,914—0,921
горчицы белой	0,912—16	мускатное	0,945—0,996
горчицы черной	0,961—69	оливковое	0,915—0,920
грецкого ореха	0,925—27	пальмовое	0,924
земляного ореха	0,917—0,926	ореховое	0,917
касторовое	0,960—0,967	персиковое	0,918—0,925
кокосового ореха	0,926	подсолнечное	0,924—0,926
какао	0,964—0,974	рапсовое	0,913—0,917
конопляное	0,928—0,934	свечного ореха	0,925—0,927
коровье 40°/15°	0,907—0,912	соевое	0,924—0,927
кукурузное	0,921—0,928	тунговое	0,939—0,949
кунжутное 23°/25°	0,919	тыквенное	0,923—0,925
лавровое 100°	0,880	хлопковое	0,917—0,918
льняное	0,930—0,938	Стеарин хлопковый	0,919—0,923

5.4. ВОДНЫЕ РАСТВОРЫ

Таблица 5.6

Плотность водного раствора этилового спирта, отнесенная к плотности воды при 4°C [1]

Концентрация спирта, вес. %	15°C	20°C	25°C	Концентрация спирта, вес. %	15°C	20°C	25°C
0	0,99913	0,99824	0,99708	50	0,91787	0,91386	0,90983
2	0,99543	0,99453	0,99338	52	0,91344	0,90940	0,90533
4	0,99197	0,99102	0,98984	54	0,90895	0,90488	0,90079
6	0,98877	0,98776	0,98651	56	0,90443	0,90034	0,89622
8	0,98581	0,98470	0,98336	58	0,89987	0,89576	0,89162
10	0,98307	0,98185	0,98038	60	0,89528	0,89115	0,88700
12	0,98049	0,97913	0,97752	62	0,89066	0,88651	0,88234
14	0,97803	0,97651	0,97474	64	0,88601	0,88185	0,87766
16	0,97563	0,97393	0,97199	66	0,88134	0,87716	0,87295
18	0,97324	0,97134	0,96922	68	0,87664	0,87244	0,86821
20	0,97080	0,96870	0,96640	70	0,87192	0,86770	0,86344
22	0,96829	0,96599	0,96352	72	0,86716	0,86292	0,85864
24	0,96566	0,96317	0,96052	74	0,86237	0,85812	0,85380
26	0,96289	0,96021	0,95739	76	0,85755	0,85328	0,84893
28	0,95997	0,95711	0,95412	78	0,85270	0,84840	0,84403
30	0,95688	0,95385	0,95071	80	0,84781	0,84349	0,83909
32	0,95360	0,95042	0,94713	82	0,84286	0,83852	0,83410
34	0,95017	0,94684	0,94342	84	0,83786	0,83350	0,82906
36	0,94657	0,94311	0,93957	86	0,83279	0,82842	0,82396
38	0,94282	0,93924	0,93560	88	0,82762	0,82323	0,81876
40	0,93893	0,93524	0,93151	90	0,82035	0,81795	0,81348
42	0,93491	0,93113	0,92732	92	0,81694	0,81255	0,80890
44	0,93078	0,92693	0,92305	94	0,81138	0,80700	0,80256
46	0,92655	0,92264	0,91870	96	0,80564	0,80129	0,79689
48	0,92225	0,91828	0,91429	98	0,79972	0,79541	0,79106
				100	0,79358	0,78933	0,78507

Таблица 5.7

Плотность водного раствора метилового спирта при 15°C, отнесенная к плотности воды при 4°C [1]

Концентрация спирта, вес. %	0	2	4	6	8	Концентрация спирта, вес. %	0	2	4	6	8
0	0,99913	0,99543	0,99198	0,98864	0,98547	60	0,89781	0,89341	0,88890	0,88433	0,87971
10	0,98241	0,97945	0,97660	0,97377	0,97096	70	0,87507	0,87033	0,86546	0,86051	0,85551
20	0,96814	0,96533	0,96251	0,95963	0,95668	80	0,85048	0,84536	0,84009	0,83475	0,82937
30	0,95366	0,95056	0,94734	0,94404	0,94067	90	0,82396	0,81849	0,81285	0,80713	0,80143
40	0,93720	0,93365	0,93001	0,92627	0,92242	100	0,79577	—	—	—	—
50	0,91852	0,91451	0,91044	0,90631	0,90210						

Таблица 5.8

Отношение плотности водных растворов веществ при различных температурах к плотности воды при температуре 4°C [1]

Концентрация, вес. %	AgNO_3 , 20°C	AlCl_3 , 18°C	Al_2Cl_6 , 15°C	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, 15°C	$\text{Al}(\text{NO}_3)_3$, 18°C	BaBr_2 , 20°C	$\text{Ba}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$, 18°C	BaCl_2 , 20°C	BaI_2 , 20°C	CaH_2O_8 , 20°C
1	1,0070	1,0075	1,0072	1,0093	1,0065	—	1,0059	—	—	1,0006
2	1,0154	1,0164	1,0144	1,0195	1,0144	1,0156	1,0133	1,0159	1,0154	1,0030
4	1,0327	1,0344	1,0289	1,0404	1,0305	1,0335	1,0282	1,0341	1,0331	1,0077
6	1,0506	1,0526	1,0435	1,0618	1,0469	1,0519	1,0433	1,0528	1,0513	1,0125
8	1,0690	1,0711	1,0585	1,0837	1,0638	1,0710	1,0587	1,0721	1,0701	1,0173
10	1,0882	1,0900	1,0734	1,1062	1,0811	1,0907	1,0745	1,0921	1,0896	1,0221
12	1,1080	1,1093	1,0890	1,1293	1,0989	1,1111	1,0908	1,1128	1,1099	1,0271
14	1,1284	1,1290	1,1047	1,1529	1,1171	1,1323	1,1075	1,1342	1,1308	1,0320
16	1,1495	1,1491	1,1207	1,1779	1,1357	1,1543	1,1246	1,1564	1,1526	1,0370
18	1,1715	—	1,1372	1,2017	1,1549	1,1770	1,1421	1,1793	1,1750	1,0420
20	1,1942	—	1,1537	1,2272	1,1745	1,2006	1,1599	1,2031	1,1984	1,0470
22	—	—	1,1709	1,2534	1,1946	—	1,1782	1,2277	—	1,0520
24	—	—	1,1882	1,2803	1,2153	—	1,1970	1,2531	—	1,0571
26	—	—	1,2058	1,3079	1,2365	—	1,2161	1,2793	—	1,0622
28	—	—	1,2241	—	1,2582	—	1,2356	—	—	1,0674
30	1,3205	—	1,2422	—	1,2805	1,3325	1,2554	—	1,3289	1,0727
35	1,3931	—	1,2905	—	—	1,4087	1,3069	—	1,404	1,0860
40	1,4743	—	1,3415	—	—	1,4926	1,3608	—	1,490	1,0995
45	1,565	—	—	—	—	—	—	—	1,587	1,1128
50	1,668	—	—	—	—	—	—	—	1,698	1,1263
55	1,786	—	—	—	—	—	—	—	1,825	1,1398
60	1,916	—	—	—	—	—	—	—	1,970	1,1533

Продолжение табл. 5.8

Концентрация, вес. %	CaSO_4 , 18°C	CrO_3 , 15°C	$\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ зеленый, 15°C	$\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ фиолетовый, 15°C	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, 20°C	CuSO_4 , 20°C	CuCl_2 , 20°C	FeCl_3 , 20°C	$\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$, 17,5°C	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, 17,5°C
1	1,0086	1,006	1,0081	1,0091	1,007	1,009	1,007	1,007	1,0080	1,007
2	1,0182	1,014	1,0172	1,0191	1,015	1,019	1,017	1,015	1,0160	1,016
4	1,0383	1,030	1,0358	1,0395	1,032	1,040	1,036	1,032	1,0320	1,033
6	1,0590	1,045	1,0551	1,0604	1,050	1,062	1,056	1,049	1,0472	1,050
8	1,0803	1,060	1,0751	1,0817	1,069	1,084	1,075	1,067	1,0620	1,067
10	1,1023	1,076	1,0958	1,1034	1,088	1,107	1,096	1,085	1,0770	1,084
12	1,1250	1,093	1,1172	1,1257	1,107	1,131	1,117	1,104	1,0934	1,103
14	1,1485	1,110	1,1392	1,1486	1,126	1,154	1,138	1,123	1,1098	1,122
16	1,1729	1,127	1,1618	1,1722	1,147	1,180	1,160	1,142	1,1268	1,141
18	1,1982	1,145	1,1851	1,1966	1,168	1,206	1,182	1,162	1,1440	1,161
20	1,2243	1,163	1,2091	1,2218	1,189	—	1,205	1,182	1,1692	1,181
22	—	1,181	1,2339	1,2479	—	—	—	—	1,1812	—
24	—	1,200	1,2594	1,2750	—	—	—	—	1,2012	—
26	—	1,220	1,2856	1,3032	—	—	—	—	1,2212	—
28	—	1,240	1,3125	1,3325	—	—	—	—	1,2416	—
30	1,3714	1,260	1,3401	—	—	—	—	1,291	1,2622	1,307
35	1,4551	1,313	1,4123	—	—	—	—	1,353	1,3164	1,376
40	1,5470	1,371	1,4893	—	—	—	—	1,418	1,3746	1,449
50	—	1,505	—	—	—	—	—	1,551	1,4972	1,613
55	—	1,581	—	—	—	—	—	—	1,5722	1,703
60	—	1,663	—	—	—	—	—	—	1,6572	1,798

Концентрация, вес. %	$C_6H_5O_7 \cdot H_2O$, 15°C	$C_{12}H_{22}O_{11}$, 20°C	$CaBr_2$, 20°C	$CaCl_2$, 20°C	CaI_2 , 20°C	$Ca(NO_3)_2$, 18°C	$CdBr_2$, 20°C	$CdCl_2$, 20°C	CdI_2 , 20°C	$Cd(NO_3)_2$, 20°C
1	—	1,0021	—	—	—	—	—	—	—	—
2	1,0074	1,0060	1,0152	1,0148	1,0150	1,0137	1,0158	1,0159	1,0153	1,0154
4	1,0149	1,0139	1,0326	1,0316	1,0323	1,0291	1,0339	1,0339	1,0328	1,0326
6	1,0227	1,0219	1,0504	1,0486	1,0500	1,0448	1,0524	1,0524	1,0507	1,0502
8	1,0309	1,0299	1,0688	1,0659	1,0683	1,0608	1,0714	1,0715	1,0690	1,0683
10	1,0392	1,0381	1,0877	1,0835	1,0873	1,0771	1,0910	1,0912	1,0819	1,0869
12	1,0470	1,0465	1,1071	1,1015	1,1069	1,0937	1,1112	1,1115	1,1075	1,1061
14	1,0549	1,0549	1,1272	1,1198	1,1273	1,1106	1,1322	1,1324	1,1278	1,1261
16	1,0632	1,0635	1,1480	1,1386	1,1485	1,1279	1,1540	1,1540	1,1489	1,1468
18	1,0718	1,0721	1,1696	1,1578	1,1703	1,1455	1,1766	1,1762	1,1709	1,1682
20	1,0805	1,0810	1,1919	1,1775	1,1928	1,1636	1,2000	1,1992	1,1937	1,1904
25	—	1,1036	1,2499	1,2284	1,2530	1,2106	1,2605	1,2604	1,2546	1,2488
30	1,1244	1,1270	1,3125	1,2816	1,3195	1,250	1,3286	1,3273	1,3219	1,3124
35	—	1,1513	1,381	1,3373	1,3928	1,311	1,4049	1,4010	1,3967	1,3822
40	1,1709	1,1764	1,457	1,3957	1,4734	1,365	1,4902	1,4833	1,4801	1,4590
45	1,1948	1,2025	1,541	—	—	1,422	—	1,5748	1,5726	1,5438
50	1,2204	1,2296	1,635	—	—	—	—	1,6762	—	1,6356
60	1,2738	1,2865	—	—	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 5.8

Концентрация, вес. %	$FeSO_4$, 18°C	H_3AsO_4 , 15°C	HBr , 20°C	$HCOOH$, 20°C	$H_3C_4H_4O_6$, 15°C	HCl , 20°C	$HClO_4$, 15°C	HF , 20°C	HI , 20°C	HIO_3 , 18°C
1	1,0085	1,0057	1,0053	1,0019	1,0045	1,0032	1,0050	—	1,0054	1,0071
2	1,0180	1,0124	1,0124	1,0044	1,0090	1,0082	1,0109	—	1,0127	1,0157
4	1,0375	1,0260	1,0269	1,0093	1,0179	1,0181	1,0228	—	1,0277	1,0334
6	1,0575	1,0398	1,0417	1,0141	1,0273	1,0279	1,0348	—	1,0431	1,0517
8	1,0785	1,0538	1,0568	1,0196	1,0371	1,0376	1,0471	—	1,0589	1,0706
10	1,1000	1,0681	1,0723	1,0246	1,0469	1,0474	1,0597	1,035	1,0751	1,0900
12	1,1220	1,0826	1,0883	1,0296	1,0565	1,0574	1,0726	—	1,0918	1,1100
14	1,1445	1,0975	1,1048	1,0345	1,0661	1,0675	1,0859	—	1,1091	1,1306
16	1,1675	1,1128	1,1219	1,0393	1,0761	1,0776	1,0995	—	1,1270	1,1519
18	1,1905	1,1285	1,1369	1,0441	1,0865	1,0878	1,1135	—	1,1456	1,1740
20	1,2135	1,1447	1,1579	1,0488	1,0969	1,0980	1,1279	1,070	1,1649	1,1969
22	—	1,1614	1,1767	1,0537	1,1072	1,1083	1,1428	—	1,1850	1,2206
24	—	1,1785	1,1961	1,0585	1,1175	1,1187	1,1581	—	1,2059	1,2450
26	—	1,1961	1,2161	1,0633	1,1282	1,1290	1,1738	—	1,2277	1,2700
28	—	1,2143	1,2367	1,0681	1,1393	1,1392	1,1900	—	1,2503	1,2956
30	—	1,2331	1,2580	1,0729	1,1505	1,1493	1,2067	1,101	1,2737	1,3218
35	—	1,2829	1,3150	1,0847	—	—	—	1,116	1,3357	1,3900
40	—	1,3370	1,3772	1,0963	1,2078	1,1980	1,2991	1,130	1,4029	1,4640
45	—	1,3959	1,4446	1,1085	—	—	1,3521	1,143	1,4755	—
50	—	1,4602	1,5173	1,1207	1,2696	—	1,4103	1,155	—	—
55	—	1,5304	1,5953	1,1320	1,3027	—	1,4733	—	—	—
60	—	1,6070	1,6787	1,1424	—	—	1,5389	—	—	—
65	—	1,6904	1,7675	1,1543	—	—	1,6059	—	—	—
70	—	—	—	1,1655	—	—	1,6736	—	—	—

Концентрация, вес. %	HNO_3 , 20°C	H_2O_2 , 18°C	H_3PO_4 , 20°C	H_2SO_4 , 20°C	H_2SeO_4 , 20°C	H_2SiF_6 , 17,5°C	KBr, 20°C	K_2CO_3 , 20°C	$\text{K}_2\text{H}_3\text{O}_8$, 18°C	$\text{K}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_8$, 20°C
1	1,0036	1,0022	1,0038	1,0051	1,0050	1,0080	1,0054	1,0072	1,0038	1,0048
2	1,0091	1,0058	1,0092	1,0118	1,0136	1,0161	1,0127	1,0163	1,0089	1,0114
4	1,0201	1,0131	1,0200	1,0250	1,0291	1,0324	1,0275	1,0345	1,0191	1,0248
6	1,0312	1,0204	1,0309	1,0385	1,0447	1,0491	1,0426	1,0529	1,0293	1,0383
8	1,0427	1,0277	1,0420	1,0522	1,0605	1,0661	1,0581	1,0715	1,0395	1,0519
10	1,0543	1,0351	1,0532	1,0661	1,0766	1,0834	1,0740	1,0904	1,0497	1,0657
12	1,0661	1,0425	1,0647	1,0802	1,0931	1,1011	1,0903	1,1096	1,0599	1,0798
14	1,0781	1,0499	1,0764	1,0947	1,1101	1,1190	1,1070	1,1291	1,0703	1,0941
16	1,0903	1,0574	1,0884	1,1094	1,1276	1,1373	1,1242	1,1490	1,0808	1,1087
18	1,1026	1,0649	1,1008	1,1243	1,1455	1,1559	1,1419	1,1692	1,0914	1,1236
20	1,1150	1,0725	1,1134	1,1394	1,1639	1,1748	1,1591	1,1898	1,1022	1,1387
22	1,1276	1,0802	1,1263	1,1548	1,1829	1,1941	1,1788	1,2107	1,1131	1,1540
24	1,1404	1,0880	1,1395	1,1704	1,2026	1,2136	1,1980	1,2320	1,1241	1,1696
26	1,1534	1,0959	1,1529	1,1862	1,2229	1,2335	1,2178	1,2536	1,1353	1,1855
28	1,1666	1,1040	1,1665	1,2023	1,2438	1,2537	1,2383	1,2756	1,1466	1,2017
30	1,1800	1,1122	1,1805	1,2185	1,2653	1,2742	1,2593	1,2979	1,1579	1,2181
35	1,2140	1,1327	1,216	1,2599	—	—	1,3147	1,3548	1,1868	1,2606
40	1,2463	1,1536	1,254	1,3028	1,3819	—	1,3746	1,4141	1,2162	1,3051
45	1,2783	1,1749	1,293	1,3476	—	—	—	1,4759	1,2465	1,3516
50	1,3100	1,1966	1,335	1,3951	1,5186	—	—	1,5404	1,2761	1,4001
55	1,3393	1,2188	1,379	1,4453	—	—	—	—	1,3065	—
60	1,3667	1,2416	1,426	1,4983	1,6850	—	—	—	1,3372	—
65	1,3913	1,2652	1,475	1,5533	—	—	—	—	—	—
70	1,4134	1,2897	1,526	1,6105	1,8870	—	—	—	—	—
75	1,4337	1,3149	1,579	1,6692	—	—	—	—	—	—
80	1,4521	1,3406	1,633	1,7272	2,1220	—	—	—	—	—
90	1,4826	—	1,746	1,8144	—	—	—	—	—	—
100	1,5129	—	1,870	1,8305	—	—	—	—	—	—

Концентрация, вес. %	KCl, 20°C	K_2CrO_4 , 19,5°C	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, 20°C	$\text{K}_2\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_4$, 15°C	KF, 18°C	$\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$, 20°C	$\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$, 20°C	KHSO_4 , 20°C	KI, 20°C	KNO_3 , 20°C
1	1,0046	1,0080	1,0052	1,007	1,0072	1,0034	1,0051	1,0051	1,0055	1,0045
2	1,0110	1,0161	1,0122	1,016	1,0159	1,0090	1,0119	1,0120	1,0130	1,0108
4	1,0239	1,0325	1,0264	1,034	1,0334	1,0201	1,0256	1,0260	1,0281	1,0234
6	1,0369	1,0492	1,0408	1,052	1,0512	1,0314	1,0395	1,0403	1,0437	1,0363
8	1,0500	1,0663	1,0554	1,070	1,0693	1,0427	1,0536	1,0549	1,0597	1,0494
10	1,0633	1,0837	1,0703	1,089	1,0877	1,0542	1,0678	1,0698	1,0761	1,0627
12	1,0768	1,1014	—	1,109	1,1064	1,0656	1,0823	1,0850	1,0930	1,0762
14	1,0905	1,1195	—	1,129	1,1254	1,0774	1,0971	1,1004	1,1104	1,0899
16	1,1043	1,1380	—	1,150	1,1448	1,0890	1,1120	1,1161	1,1284	1,1039
18	1,1185	1,1570	—	1,171	1,1646	1,1010	—	—	1,1469	1,1181
20	1,1328	1,1765	—	1,193	1,1847	1,1130	—	—	1,1660	1,1326
22	1,1474	1,1964	—	1,216	1,2052	—	—	—	1,1857	1,1473
24	1,1623	1,2169	—	1,239	1,2260	—	—	—	1,2060	1,1623
26	—	1,2379	—	1,263	1,2471	—	—	—	1,2270	—
35	—	1,3386	—	1,383	—	—	—	—	1,3308	—

Концентрация, вес. %	NaBr, 20°C	NaBrO ₃ , 18°C	NaC ₂ H ₃ O ₂ , 20°C	Na ₂ CO ₃ , 20°C	NaCl, 20°C	NaClO ₄ , 18°C	Na ₂ Cr ₂ O ₇ , 15°C	NaKC ₄ H ₄ O ₆ , 20°C	NaNO ₃ , 20°C	NaOH, 20°C
1	1,0060	1,0064	1,0033	1,0052	1,0086	1,0051	1,006	1,0049	1,0049	1,0095
2	1,0139	1,0143	1,0084	1,0123	1,0190	1,0116	1,013	1,0116	1,0117	1,0207
4	1,0298	1,0305	1,0185	1,0266	1,0398	1,0247	1,027	1,0252	1,0254	1,0428
6	1,0462	1,0471	1,0289	1,0410	1,0606	1,0381	1,041	1,0390	1,0392	1,0648
8	1,0631	1,0641	1,0392	1,0555	1,0816	1,0517	1,056	1,0530	1,0532	1,0869
10	1,0803	1,0816	1,0495	1,0702	1,1029	1,0656	1,070	1,0673	1,0674	1,1089
12	1,0981	1,0996	1,0598	1,0851	1,1244	1,0798	1,084	1,0818	1,0819	1,1309
14	1,1164	1,1182	1,0702	1,1002	1,1463	1,0943	1,098	1,0965	1,0967	1,1530
16	1,1352	1,1373	1,0807	1,1150	—	1,1090	1,112	1,1114	1,1118	1,1751
18	1,1546	1,1569	1,0913	1,1313	—	1,1241	1,126	1,1265	1,1272	1,1972
20	1,1745	1,1771	1,1021	1,1471	—	1,1396	1,140	1,1419	1,1429	1,2191
22	1,1951	1,1979	1,1130	1,1630	—	1,1554	1,153	1,1576	1,1589	1,2411
24	1,2163	1,2193	1,1240	1,1797	—	1,1717	1,166	1,1735	1,1752	1,2629
26	1,2382	—	1,1351	1,1963	—	1,1883	1,159	1,1896	1,1917	1,2848
28	1,2608	—	1,1462	—	—	1,2053	1,193	1,2059	1,2085	1,3068
30	1,2841	—	—	—	—	1,2227	1,207	1,2225	1,2256	1,3279
35	1,3462	—	—	—	—	1,2685	1,244	1,2654	1,2701	1,3798
40	1,4138	—	—	—	—	—	1,279	—	1,3175	1,4300
45	—	—	—	—	—	—	1,312	—	1,3683	—

Концентрация, вес. %	NaHSO ₃ , 15,6°C	Na ₂ SO ₃ , 19°C	Na ₂ SO ₄ , 15°C	Na ₂ S ₂ O ₃ , 20°C	NICl ₂ , 20°C	NI(NO ₃) ₂ , 20°C	NI ₂ SO ₄ , 18°C	Pb(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ , 18°C	Pb(NO ₃) ₂ , 18°C	SO ₂ , 15,6°C
1	1,0069	1,0078	1,0073	1,0065	1,008	1,007	1,009	1,0061	1,0074	1,0069
2	1,0140	1,0172	1,0164	1,0148	1,018	1,015	1,020	1,0137	1,0163	1,0140
4	1,0284	1,0363	1,0348	1,0315	1,037	1,033	1,042	1,0290	1,0344	1,0284
6	1,0432	1,0556	1,0535	1,0483	1,057	1,050	1,063	1,0446	1,0529	1,0432
8	1,0584	1,0751	1,0724	1,0654	1,078	1,069	1,085	1,0605	1,0720	1,0584
10	1,0741	1,0948	1,0915	1,0827	1,099	1,088	1,109	1,0768	1,0918	1,0741
12	1,0902	1,1146	1,1109	1,1003	1,121	1,107	1,133	1,0936	1,1123	1,0902
14	1,1069	1,1346	1,1306	1,1182	1,143	1,127	1,158	1,1109	1,1336	1,1069
16	1,1240	1,1549	1,1506	1,1365	1,167	1,148	1,183	1,1283	1,1557	1,1240
18	1,1417	1,1755	1,1709	1,1551	1,191	1,169	1,209	1,1473	1,1789	1,1417
20	1,1600	—	1,1915	1,1740	1,215	1,191	—	1,1663	1,2030	1,1600
22	1,1789	—	1,2124	1,1932	—	—	—	1,1860	1,2277	1,1789
24	1,1983	—	1,2336	1,2128	—	—	—	1,2063	1,2529	1,1983
26	1,2185	—	—	1,2328	—	—	—	1,2273	1,2783	1,2185
28	1,2393	—	—	1,2532	—	—	—	1,2489	1,3037	1,2393
30	1,2609	—	—	1,2739	1,353	1,311	—	1,2711	1,3289	1,2609
35	1,3182	—	—	1,3273	—	1,377	—	1,3304	—	1,3182
40	—	—	—	1,3827	—	—	—	1,3994	—	—

Концентрация, вес. %	SnCl_2 , 15°C	SnCl_4 , 15°C	SrBr_2 , 20°C	SrI_2 , 20°C	ZnBr_2 , 20°C	ZnCl_2 , 20°C	ZnI_2 , 20°C	$\text{Zn(NO}_3)_2$, 18°C	ZnSO_4 , 20°C	$\text{Sr(NO}_3)_2$, 20°C
1	1,0068	1,007	—	—	—	—	—	—	—	—
2	1,0146	1,015	1,0157	1,0154	1,0167	1,0167	1,016	1,0154	1,0190	1,0150
4	1,0306	1,031	1,0337	1,0331	1,0354	1,0350	1,034	1,0322	1,0403	1,0310
6	1,0470	1,047	1,0522	1,0513	1,0544	1,0532	1,053	1,0496	1,0620	1,0480
8	1,0638	1,064	1,0712	1,0701	1,0738	1,0715	1,072	1,0675	1,0842	1,0650
10	1,0810	1,081	1,0907	1,0896	1,0935	1,0819	1,091	1,0859	1,1071	1,0830
12	1,0986	1,099	1,1109	1,1099	1,1135	1,1085	1,111	1,1048	1,1308	1,1010
14	1,1167	1,117	1,1317	1,1308	1,1338	1,1275	1,131	1,1244	1,1553	1,1190
16	1,1353	1,135	1,1532	1,1526	1,1544	1,1468	1,152	1,1445	1,1806	1,1380
18	1,1545	1,154	1,1757	1,1753	1,1753	1,1665	1,174	1,1652	—	1,1580
20	1,1743	1,173	1,1992	1,1990	1,1965	1,1866	1,197	1,1865	—	1,179
25	—	—	1,2620	1,2608	1,2543	1,2380	1,258	1,2427	—	1,233
30	1,2837	1,278	1,3300	1,3295	1,3170	1,2928	1,325	1,3029	—	1,290
35	1,3461	1,337	1,4050	1,4058	1,3859	1,3522	1,398	1,3678	—	1,352
40	1,4145	1,403	1,4890	1,4904	1,4620	1,4173	1,478	1,4378	—	1,419
45	1,4897	1,475	1,5830	1,5844	1,5470	1,4890	1,566	1,5134	—	—
50	1,5729	1,555	1,6860	—	1,6430	1,5681	1,663	1,5944	—	—
55	1,6656	1,644	—	—	1,7500	1,655	1,770	—	—	—
60	1,7695	1,742	—	—	1,8690	1,749	1,893	—	—	—
65	1,8865	1,851	—	—	2,0020	1,851	2,036	—	—	—
70	—	1,971	—	—	—	1,962	2,202	—	—	—

Концентрация, вес. %	KOH , 15°C	LiBr , 20°C	LiCl , 20°C	LiI , 20°C	MgBr_2 , 20°C	MgCl_2 , 20°C	MgI_2 , 20°C	$\text{Mg(NO}_3)_2$, 20°C	MgSO_4 , 20°C	MnBr_2 , 18°C
1	1,0083	1,0055	1,0041	1,0056	—	—	—	—	—	1,0071
2	1,0175	1,0128	1,0099	1,0131	1,0151	1,0146	1,0149	1,0132	1,0186	1,0157
4	1,0359	1,0277	1,0215	1,0284	1,0324	1,0311	1,0321	1,0285	1,0392	1,0332
6	1,0544	1,0429	1,0330	1,0442	1,0501	1,0478	1,0498	1,0441	1,0602	1,0511
8	1,0730	1,0585	1,0444	1,0604	1,0683	1,0646	1,0680	1,0600	1,0816	1,0695
10	1,0918	1,0746	1,0559	1,0771	1,0871	1,0816	1,0869	1,0762	1,1034	1,0886
12	1,1108	1,0910	1,0675	1,0943	1,1065	1,0989	1,1065	1,0928	1,1256	1,1083
14	1,1299	1,1079	1,0792	1,1120	1,1265	1,1164	1,1268	1,1098	1,1484	1,1287
16	1,1493	1,1253	1,0910	1,1303	1,1471	1,1342	1,1478	1,1272	1,1717	1,1498
18	1,1688	1,1432	1,1029	1,1492	1,1683	1,1523	1,1695	1,1449	1,1955	1,1716
20	1,1884	1,1616	1,1150	1,1688	1,1903	1,1706	1,1920	1,1630	1,2198	1,1942
22	1,2083	1,1806	1,1274	1,1890	—	—	—	1,1815	1,2447	1,2176
24	1,2285	1,2002	1,1399	1,2099	—	—	—	1,2004	1,2701	1,2419
26	1,2489	1,2205	1,1527	1,2315	—	—	—	—	1,2961	1,2672
28	1,2695	1,2414	1,1658	1,2540	—	—	—	—	—	1,2934
30	1,2905	1,2629	1,1791	1,2772	1,3110	1,2688	1,3180	—	—	1,3206
35	1,3440	1,3204	—	1,3393	1,3790	—	1,3914	—	—	—
40	1,3991	1,3836	—	1,4078	1,452	—	1,4730	—	—	—
45	1,4558	1,4535	—	1,4840	1,532	—	—	—	—	—

Концентрация, вс., %	MnCl ₂ , 18°C	M (NO ₃) ₂ , 18°C	MnSO ₄ , 20°C	NH ₃ , 20°C	N ₂ H ₄ , 15°C	NH ₄ C ₂ H ₃ O ₂ , 25°C	NH ₄ Cl, 20°C	NH ₄ I, 18°C	NH ₄ NO ₃ , 17,5°C	(NH ₄) ₂ SO ₄ , 20°C
1	1,0069	1,0063	1,0080	0,9939	1,0002	0,9992	1,0013	1,0050	1,0042	1,0041
2	1,0153	1,0140	1,0178	0,9895	1,0013	1,0013	1,0045	1,0114	1,0085	1,0101
4	1,0324	1,0298	1,0378	0,9811	1,0034	1,0055	1,0107	1,0244	1,0170	1,0229
6	1,0498	1,0459	1,0583	0,9730	1,0056	1,0096	1,0168	1,0377	1,0255	1,0338
8	1,0676	1,0624	1,0794	0,9651	1,0077	1,0136	1,0227	1,0513	1,0340	1,0456
10	1,0859	1,0794	1,1012	0,9575	1,0099	1,0176	1,0286	1,0652	1,0425	1,0574
12	1,1046	1,0969	1,1236	0,9501	1,0121	1,0216	1,0344	1,0795	1,0512	1,0691
14	1,1238	1,1149	1,1467	0,9430	1,0143	1,0255	1,0401	1,0942	1,0599	1,0808
16	1,1435	1,1333	1,1705	0,9362	1,0164	1,0294	1,0457	1,1093	1,0686	1,0924
18	1,1638	1,1522	1,1950	0,9295	1,0186	1,0331	1,0512	1,1248	1,0773	1,1039
20	1,1846	1,1717	—	0,9229	1,0207	1,0368	1,0567	1,1407	1,0860	1,1154
22	1,2061	1,1918	—	0,9164	1,0228	1,0404	1,0621	1,1570	1,0950	1,1269
24	1,2283	1,2125	—	0,9101	1,0248	1,0439	1,0674	1,1737	1,1040	1,1383
26	1,2511	1,2338	—	0,9040	1,0267	1,0473	—	1,1908	1,1130	1,1496
28	1,2746	1,2557	—	0,8980	1,0286	1,0507	—	1,2084	1,1220	1,1609
30	1,2988	1,2781	—	0,8920	1,0305	1,0540	—	1,2265	1,1310	1,1721
35	—	—	—	—	1,0350	1,0618	—	1,2745	1,1550	1,2000
40	—	—	—	—	1,0380	1,0691	—	1,3264	1,1790	1,2277
45	—	—	—	0,849*	1,0420	1,0760	—	1,3823	1,2045	1,2552
50	—	—	—	0,832*	1,044	—	—	—	1,2300	1,2825
55	—	—	—	0,815*	1,046	—	—	—	1,2567	—
60	—	—	—	0,796*	1,047	—	—	—	1,2835	—

* При $t = 15^\circ\text{C}$.

5.5. СПЛАВЫ

Таблица 5.9

Плотность сплавов, 10^3 кг/м^3 [1,2]

Сплав (состав, вес. %)	ρ
Бронза:	
оловянистая (Cu; Sn)	8,6—9,3
фосфористая (92,5% Cu; 7% Sn; 0,5% P)	8,7—8,9
Дюралюминий (Cu; Mg; Si; Mn)	2,79
Инвар (63,8% Fe; 3,6% Ni; 0,2% C)	8,00
Константан (60% Cu; 40% Ni)	8,88
Латунь (66% Cu; 34% Zn)	8,4—8,7
Магналиум (90% Al; 10% Mg)	2,50
Манганин (84% Cu; 12% Mn; 4% Ni)	8,5
Монель-металл (71% Ni; 27% Cu; 2% Fe)	8,9
Платинс-иридиевый сплав (90% Pt; 10% Ir)	21,62
Сплав Вуда (50% Bi; 12,5% Cd; 25% Pb; 12,5% Sn)	9,70
Сталь:	
катаная	7,85—8,0
литая	7,5—7,92

Плотность веществ при 20°C, 10³ кг/м³ [2]

Вещество	ρ	Вещество	ρ
Дерево (сухое)		Газовый	1,88
Атласное	0,95	угль	
Бальза (проб- ковое)	0,11—0,14	Галенит	7,3—7,6
Бамбук	0,31—0,40	Гематит	4,9—5,3
Бук	0,70—0,90	Гипс	2,31—2,33
Береза	0,51—0,77	Глина	1,8—2,6
Вишня	0,70—0,90	Гранат	3,15—4,3
Гикори	0,60—0,93	Гранит	2,34—2,76
Груша	0,61—0,73	Доломит	2,84
Дуб	0,60—0,90	Известняк	2,58—2,76
Ель канадская	0,48—0,70	Известь га- шеная	1,3—1,4
Железное (ба- каут)	1,17—1,33	Кальцит	2,6—2,8
Ива	0,40—0,60	Кварц:	
Каменное	1,00	плавленый	2,65
Кедр	0,49—0,57	прозрач- ный	2,21
Кизил	0,76	непроз- рачный	2,07
Клен	0,62—0,75	Кокс	1,0—1,7
Красное (Гон- дурас)	0,66	Копал	1,04—1,14
Красное (Ис- пания)	0,85	Корунд	3,9—4,0
Липа	0,32—0,59	Кремень	2,63
Можжевелник	0,56	Магнетит	4,9—5,2
Ольха	0,42—0,68	Малахит	3,7—4,1
Ореховое	0,64—0,70	Мел	1,9—2,8
Остролист	0,76	Мрамор	2,6—2,84
Платан	0,40—0,60	Наждак	4,0
Рожковое	0,67—0,71	Опал	2,2
Самшит	0,95—1,16	Песчаник	2,14—2,36
Сандаловое	0,91	Пирит	4,95—5,1
Слива	0,66—0,78	Полевой шпат	2,55—2,75
Сосна:		Порфир	2,6—2,9
белая	0,55—0,50	Роговая об- манка	2,9—3,2
обыкновенная	0,37—0,60	Серпентин	2,5—2,65
Тик:		Сланец	2,6—3,3
индийский	0,66—0,88	Слюда:	
африканский	0,98	белая	2,76—3,00
Тополь	0,35—0,5	обычная	2,6—3,2
Эбеновое (чер- ное)	1,11—1,33	черная	2,7—3,1
Эльм	0,54—0,60	Соль камен- ная	2,18
Яблоня	0,66—0,84	Тальк	2,7—2,8
Ясень	0,65—0,85	Топаз	3,5—3,6
Минералы		Торф прес- сованный	0,84
Агат	2,5—2,7	Торианит	9,32—9,33
Алебастр:		(R)*	
карбонатный	2,69—2,78	Торит (R)	4,5—5,4
сульфатный	2,26—2,32	Трогерит (R)	3,3
Алмаз	3,01—3,52	Турмалин	3,0—3,2
Альбит	2,62—2,65	Уголь:	
Анортит	2,74—2,76	антрацит	1,4—1,8
Асбест	2,0—2,8	битумн- иозный	1,2—1,5
Асбестовый сланец	1,8	Уранит (R)	6,5—9,7
Базальт	2,4—3,1		
Берилл	2,69—2,70		

* (R) — радиоактивные минералы.

Вещество	ρ	Вещество	ρ
Уранит:		Сахар	1,59
кальцевый (R)	3,05—3,19	Снег (рых- лый)	0,12
медный (R)	3,22—3,60	Скипидар	1,07
Флюорит	3,18	Стекло:	
Другие вещества		обычно- венное	2,4—2,8
Асфальт	1,1—1,5	флинтглас	3,9—5,9
Бумага	0,7—1,15	Сургуч	1,8
Гуммиарабик	1,3—1,4	Уголь дре- весный:	
Гуммигут	1,2	дубовый	0,57
Деготь, смола	1,02	сосновый	0,28—0,44
Желатин	1,27	Фарфор	2,3—2,5
Камень мыль- ный	2,6—2,8	Фибра крас- ная	1,45
Камфара	0,99	Циллюлоид	1,4
Картон	0,69	Цемент за- твердев- ший	2,7—3,0
Киноварь	8,12	Шлак	2,0—3,9
Кирпич	1,4—2,2	Эбонит	1,15
Кожа сухая	0,86	Янтарь	1,1
Кость	1,7—2,0	Каучук:	
Кость слоновая	1,83—1,92	чистый	0,906
Клей	1,27	техниче- ский	0,911
Крахмал	1,53	мягкий вул- канизиро- ванный с 20% серы	0,923
Лед	0,917	Плексиглас	1,18
Линолеум	1,18	Шелк	1,56
Охра	3,5	Шерсть	1,61
Парафин	0,87—0,91	Пемза	0,4
Пена морская	0,99—1,28		
Пирекс	2,25		
Пробка	0,22—0,26		
Резина:			
мягкая	1,1		
твердая	1,19		
чистая	0,91—0,93		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Handbook of Chemistry and Physics. 33rd edition, Cleveland, Ohio s. a.
2. Кэй Д., Лэби Т. Справочник физика-экспериментатора. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1949.
3. Кэй Д., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. Пер. с англ. Под ред. К.П. Яковлева. М., Физматгиз, 1962.
4. Handbook of Chemistry and Physics, 35th edition.
5. Фастовский В. Г. Разделение газовых смесей. М., Гостехиздат, 1947.

СЖИМАЕМОСТЬ ВЕЩЕСТВ

Коэффициент сжимаемости есть доля уменьшения объема тела при увеличении давления на 1 атм (760 мм рт. ст.):

$$\chi = (1/V) (\delta V / \delta P),$$

где δV — изменение объема V при изменении давления на δP ; температура при этом предполагается постоянной. Коэффициент сжимаемости изменяется с уменьшением температуры тела, а также с изменением давления, под которым оно находится:

$$\chi = \frac{A}{V(P + P_T)},$$

где A — функция, возрастающая с температурой; P — внешнее давление; P_T — давление Ван-дер-Ваальса при температуре T . Для твердых тел $\chi = 1/M$, где $M = E/[\rho(1 - 2\mu)]$ — модуль объемной деформации; E — модуль Юнга; ρ — плотность; μ — коэффициент Пуассона.

6.1. ГАЗЫ

В табл. 6.1 приведен относительный объем воздуха при различных давлениях и температурах. Объем при 0°C и 760 мм рт. ст. принят за 10^6 [1].

В табл. 6.2—6.15 приведены значения произведений PV , отнесенные к P_0V_0 при нормальных условиях [2].

Таблица 6.1

Упругие свойства воздуха

P , атм	0°C	99,4°C	200,4°C	P , атм	0°C	99,4°C	200,4°C
100	9730	—	—	600	2450	3180	3883
205	5050	7360	9430	700	2288	2904	3502
300	3658	5170	6622	800	2168	2699	3219
400	3036	4170	5240	900	2070	2544	3000
500	2680	3565	4422	1000	1992	2415	2828

Таблица 6.2

Отношение PV/P_0V_0 для азота N_2

P , атм	Температура, °C									
	—130	—100	—50	0	50	100	150	200	300	400
0	0,5243	0,6342	0,8173	1,0005	1,1836	1,3667	1,5499	1,7330	2,0993	2,4655
1	0,5208	0,6319	0,8162	1,0000	1,1836	1,3670	1,5503	1,7336	2,1000	2,4664
10	0,4873	0,6109	0,8059	0,9961	1,1837	1,3698	1,5551	1,7398	2,1084	2,4759
20	0,4466	0,5879	0,7951	0,9924	1,1842	1,3732	1,5606	1,7470	2,1177	2,4865
40	0,3487	0,5406	0,7757	0,9840	1,1866	1,3810	1,5724	1,7618	2,1367	2,5080
60	0,2482	0,4970	0,7596	0,9840	1,1908	1,3901	1,5851	1,7773	2,1560	2,5300
80	—	0,4631	0,7476	0,9838	1,1967	1,4005	1,5989	1,7935	2,1756	2,5523
100	—	0,4471	0,7407	0,9866	1,2044	1,4123	1,6136	1,8105	2,1956	2,5748
200	—	—	0,785	1,036	1,2692	1,990	1,700	1,912	2,313	2,697
400	—	—	1,033	1,237	1,483	1,704	1,920	2,146	2,551	2,945
600	—	—	1,316	1,525	1,741	1,957	2,171	2,396	2,804	3,198
800	—	—	1,593	1,799	2,009	2,221	2,432	2,656	3,062	3,459
1000	—	—	1,857	2,068	2,276	2,486	2,696	2,921	3,317	3,722

Таблица 6.3

Отношение PV/P_0V_0 для аммиака NH_3

P , атм	Температура, °C					P , атм	Температура, °C				
	100	150	200	250	300		100	150	200	250	300
0	1,3886	1,5747	1,7608	1,9468	2,1329	50	0,997	1,329	1,587	1,819	2,034
1	1,3805	1,5679	1,7546	1,9420	2,1276	60	—	1,274	1,551	1,793	2,016
10	1,323	1,527	1,725	1,919	2,110	70	—	1,215	1,514	1,768	1,997
20	1,254	1,481	1,691	1,892	2,091	80	—	—	1,477	1,742	1,978
30	1,179	1,433	1,657	1,869	2,071	90	—	—	1,438	1,716	1,960
40	1,005	1,383	1,622	1,843	2,053	100	—	—	—	1,690	1,942

Таблица 6.4

Отношение PV/P_0V_0 для аргона Ar

P, атм	Температура, °C							
	—100	—50	0	50	100	200	300	400
0	0,6345	0,8178	1,0010	1,1842	1,3674	1,7339	2,1003	2,4668
1	0,6316	0,8116	1,0000	1,1837	1,3673	1,7341	2,1008	2,4675
10	0,6048	0,8010	0,9914	1,1795	1,3658	1,7361	2,1054	2,4736
20	0,5730	0,7843	0,9823	1,1651	1,3644	1,7385	2,1105	2,4804
40	0,5029	0,7518	0,9653	1,1634	1,3625	1,7440	2,1211	2,4941
60	0,4237	0,7206	0,9503	1,1611	1,3619	1,7504	2,1321	2,5078
80	0,3340	0,6919	0,9327	1,1563	1,3625	1,7517	2,1434	2,5214
100	—	0,6669	0,9262	1,1529	1,3648	1,7659	2,1550	2,5351
150	—	—	—	—	1,3741	—	—	—
200	—	—	—	—	1,3915	—	—	—

Таблица 6.5

Отношение PV/P_0V_0 для водорода H₂

Р, атм	Температура, °С										
	—207,9	—183	—150	—100	—50	0	50	100	200	300	400
0	0,2388	0,3299	0,4506	0,6335	0,8164	0,9994	1,1823	1,3652	1,7311	2,097	2,463
1	0,2373	0,3296	0,4507	0,6339	0,8170	1,0000	1,1830	1,3659	1,7318	2,097	2,463
10	0,2308	0,3278	0,4521	0,6377	0,8219	1,0056	1,1891	1,3721	1,7381	2,104	2,468
20	0,2238	0,3264	0,4540	0,6420	0,8274	1,0119	1,1959	1,3791	1,7451	2,111	2,473
40	0,2134	0,3261	0,4591	0,6513	0,8388	1,0247	1,2094	1,3930	1,7591	2,126	2,484
60	0,2126	0,3238	0,4657	0,6612	0,8506	1,0376	1,2229	1,4069	1,7731	2,141	2,495
80	0,2186	0,3345	0,4739	0,6719	0,8628	1,0508	1,2364	1,4210	1,7872	2,156	2,505
100	—	0,3433	0,4938	0,6833	0,8754	1,0641	1,2500	1,4352	1,8012	2,171	2,516
200	—	—	—	—	0,941	1,133	1,320	1,507	1,885	2,251	2,608
400	—	—	—	—	1,083	1,276	1,464	1,651	2,034	2,398	2,765
600	—	—	—	—	1,230	1,422	1,608	1,796	2,177	2,540	—
800	—	—	—	—	1,376	1,567	1,751	1,938	2,320	2,677	—
1000	—	—	—	—	1,519	1,709	1,892	2,078	2,461	2,813	—

Таблица 6.6

Отношение PV/P_0V_0 для гелия He

P, атм	Температура, °C								
	—252,8	—208	—183	—150	—100	—50	0	50	100
0	0,0745	0,2384	0,3299	0,4506	0,6336	0,8165	0,9995	1,1824	1,3654
1	0,0745	0,2389	0,3305	0,4512	0,6342	0,8171	1,0000	1,1829	1,3658
10	0,0744	0,2428	0,3348	0,4558	0,6390	0,8219	1,0047	1,1876	1,3704
50	0,0891	0,2621	0,3547	0,4768	0,6606	0,8434	1,0257	1,2086	1,3907
100	0,1206	0,2880	0,3816	0,5042	0,6884	0,8707	1,0519	1,2348	1,4161

Продолжение табл. 6.6

P, атм	Температура, °C									
	200	300	400	P, атм	—70	—35	0	50	100	200
0	1,7313	2,0972	2,4631	200	0,8490	0,9759	1,1036	1,2859	1,4660	1,8283
1	1,7317	2,0975	2,4633	400	0,9491	1,0769	1,2026	1,3848	1,5635	1,9179
10	1,7361	2,1017	2,4674	600	1,0481	1,1744	1,3003	1,4768	1,6553	2,0152
50	1,7559	2,1204	2,4855	800	1,1417	1,2682	1,3924	1,5706	1,7481	2,0983
100	1,7805	2,1439	2,5081	1000	—	—	1,4838	1,6602	1,8359	2,1880

Отношение PV/P_0V_0 для двуокиси углерода CO_2

$P, \text{ атм}$	Температура, °C											
	0	10	20	30	40	50	60	80	100	137	198	258
0	1,0068	1,0437	1,0805	1,1174	1,1543	1,1911	1,2280	1,3017	1,3754	1,5118	1,7366	1,9758
50	0,105	0,115	0,680	0,775	0,850	0,920	0,984	1,096	1,207	1,380	1,633	1,893
75	0,153	0,163	0,180	0,219	0,620	0,747	0,841	0,988	1,118	1,318	1,615	1,867
100	0,202	0,213	0,229	0,255	0,309	0,491	0,661	0,873	1,030	1,259	1,582	1,847
150	0,295	0,309	0,326	0,346	0,377	0,419	0,485	0,681	0,878	1,158	1,530	1,818
200	0,385	0,401	0,419	0,440	0,468	0,500	0,543	0,660	0,815	1,096	1,496	1,804
300	0,560	0,578	0,599	0,623	0,649	0,677	0,710	0,790	0,890	1,108	1,494	1,820
400	0,728	0,748	0,771	0,795	0,823	0,852	0,884	0,956	1,039	1,218	1,563	1,883
500	0,991	0,913	0,938	0,963	0,990	1,021	1,054	1,124	1,200	1,362	1,678	—
600	1,050	1,073	1,100	1,128	1,157	1,187	1,219	1,290	1,366	1,518	1,812	—
700	1,206	1,232	1,259	1,289	1,319	1,350	1,383	1,454	1,528	1,676	1,956	—
800	1,358	1,387	1,417	1,448	1,479	1,510	1,544	1,614	1,689	1,836	2,108	—
900	1,509	1,539	1,569	1,633	1,633	1,665	1,700	1,771	1,846	1,994	2,260	—
1000	1,656	1,685	1,716	1,780	1,780	1,814	1,848	1,921	1,999	—	—	—

Таблица 6.8

Отношение PV/P_0V_0 для кислорода O_2

$P, \text{ атм}$	Температура, °C						$P, \text{ атм}$	Температура, °C					
	0	15,6	50	100	199,5	200		0	15,6	50	100	199,5	200
0	1,0010	—	1,1842	1,3674	—	—	700	1,39	1,4515	—	1,83	2,2415	2,24
1	1,0000	—	1,1837	1,3672	—	—	800	1,50	1,566	—	1,93	2,343	2,34
10	0,991	—	1,180	1,366	—	—	1000	1,74	1,798	—	2,15	—	—
20	0,982	—	1,175	1,365	—	—	1200	1,9620	2,0268	—	—	—	—
40	0,965	—	1,167	1,363	—	—	1400	2,1798	2,247	—	—	—	—
60	0,949	—	1,161	1,363	—	—	1600	2,396	2,464	—	—	—	—
80	0,936	—	1,156	1,363	—	—	1800	2,6073	2,6793	—	—	—	—
100	0,923	1,0045	1,152	1,365	—	—	2000	2,816	2,888	—	—	—	—
200	0,91	0,9945	—	1,40	1,189	1,82	2200	3,0217	3,0932	—	—	—	—
300	0,96	1,042	—	1,45	1,885	1,89	2400	3,2244	3,2976	—	—	—	—
400	1,05	1,125	—	1,53	1,961	1,96	2600	3,4229	3,4996	—	—	—	—
500	1,16	1,227	—	1,62	2,05	2,05	2800	3,6176	3,6946	—	—	—	—
600	1,27	1,337	—	1,72	2,142	2,14	3000	—	3,888	—	—	—	—

Таблица 6.9

Отношение PV/P_0V_0 для криптона Kr

$P, \text{ атм}$	При температуре 11,2°С	$P, \text{ атм}$	При температуре 11,2°С	$P, \text{ атм}$	При температуре 273,3°С
25,88	1,012	53,72	0,937	50,93	1,882
27,91	1,008	57,81	0,918	54,82	1,880
30,31	1,000	63,07	0,901	59,36	1,874
33,15	0,993	69,46	0,884	65,12	1,868
36,60	0,980	72,10	0,863	71,20	1,862
40,89	0,968	87,39	0,841	79,25	1,859
46,29	0,953	101,74	0,821	89,53	1,856
49,58	0,940	—	—	104,09	1,877

Таблица 6.10

Отношение PV/P_0V_0 для ксенона Xe

$P, \text{ атм}$	При температуре 11,2°С	$P, \text{ атм}$	При температуре 11,2°С	$P, \text{ атм}$	При температуре 273,3°С
25,65	0,697	36,39	0,628	53,53	1,397
26,62	0,691	38,42	0,612	57,97	1,389
27,68	0,685	40,69	0,598	63,21	1,377
28,79	0,677	43,24	0,576	69,62	1,375
30,07	0,670	46,22	0,552	77,54	1,359
31,40	0,659	49,39	0,522	88,15	1,354
32,92	0,650	53,20	0,537	102,55	1,357
34,57	0,640	—	—	—	—

Отношение PV/P_0V_0 для неона Ne

$P, \text{ атм}$	Температура, °C										
	—207,9	—182,5	—150	—100	—50	0	50	100	200	300	400
0	0,2388	0,3317	0,4506	0,6336	0,8166	0,9995	1,1825	1,3654	1,7313	2,0973	2,4632
1	0,2380	0,3315	0,4507	0,6340	0,8170	1,0000	1,1830	1,3659	1,7318	2,0977	2,4636
10	0,2300	0,328	0,451	0,637	0,821	1,0044	1,1879	1,3710	1,7371	2,1033	2,4691
50	0,196	0,319	0,454	0,649	0,838	1,024	1,209	1,394	1,761	2,128	2,494
100	0,185	0,318	0,465	0,667	0,861	1,050	1,236	1,422	1,791	2,158	2,524
150	—	—	—	—	—	1,077	1,264	1,452	—	—	—
200	—	—	—	—	—	1,105	1,293	1,481	—	—	—

Таблица 6.12

Отношение PV/P_0V_0 для окиси азота NO

P, атм	Температура, °C								
	—70	—50	—25	0	25	50	100	150	200
0	0,744	0,817	0,909	1,0007	1,092	1,184	1,367	1,550	1,733
1	0,743	0,816	0,908	1,000	1,092	1,184	1,367	1,550	1,734
25	0,703	0,790	0,894	0,989	1,087	1,182	1,375	1,570	1,758
50	0,664	0,762	0,877	0,979	1,083	1,183	1,384	1,582	1,776
75	0,632	0,739	0,863	0,973	1,083	1,188	1,395	1,598	1,795
100	0,615	0,726	0,859	0,972	1,084	1,195	1,406	1,615	1,815
150	0,619	0,730	0,866	0,987	1,108	1,219	1,439	1,654	1,860
200	0,663	0,766	0,902	1,015	1,138	1,256	1,479	1,699	1,909
300	0,796	0,877	1,009	1,113	1,234	1,352	1,580	1,805	2,018
400	0,943	1,028	1,140	1,242	1,356	1,472	1,696	1,918	2,138
600	1,239	1,322	1,428	1,524	1,625	1,738	1,956	2,176	2,392
800	1,524	1,610	1,715	1,806	1,990	2,014	2,224	2,444	2,660
1000	1,799	1,687	1,994	2,083	2,186	2,283	2,494	2,714	2,926

Таблица 6.13

Отношение PV/P_0V_0 для метана CH₄

P, атм	Температура, °C								
	—70	—50	—25	0	25	50	100	150	200
0	0,7455	0,8189	0,9106	1,0024	1,0942	1,1859	1,3694	1,5529	1,7365
1	0,7410	0,8150	0,9075	1,0000	1,0922	1,1845	1,3686	1,5525	1,7363
20	0,647	0,740	0,849	0,954	1,056	1,156	1,351	1,543	—
40	0,524	0,655	0,787	0,907	1,020	1,128	1,335	1,536	—
60	0,337	0,555	0,724	0,861	0,986	1,102	1,321	1,530	—
80	0,256	0,460	0,665	0,819	0,955	1,080	1,310	1,526	—
100	0,281	0,409	0,617	0,784	0,930	1,062	1,302	1,524	—
120	0,318	0,410	0,588	0,758	0,910	1,048	1,296	1,525	—
140	0,354	0,430	0,580	0,743	0,898	1,039	1,294	1,527	—
160	0,392	0,460	0,589	0,740	0,893	1,035	1,295	1,532	—
180	0,429	0,429	0,608	0,746	0,894	1,036	1,298	1,539	—
200	0,466	0,527	0,632	0,761	0,903	1,043	1,305	1,548	—
300	0,646	0,703	0,788	0,889	1,006	1,129	1,379	1,623	—
400	0,819	0,875	0,956	1,049	1,150	1,261	1,493	1,727	—
500	0,987	1,043	1,122	1,209	1,306	1,411	1,628	1,854	—
600	1,149	1,207	1,286	1,371	1,466	1,565	1,773	1,994	—
800	1,463	1,525	1,605	1,689	1,780	1,878	2,074	2,283	—
1000	1,766	1,829	1,911	2,000	2,089	2,185	2,376	2,580	—

Отношение PV/P_0V_0 для этана C_2H_6

$P, \text{ атм}$	Температура, °C					
	25	50	100	150	200	250
0	1,1044	1,1970	1,3822	1,5674	1,7526	1,9378
10	1,012	1,118	1,325	1,524	1,713	1,911
20	0,909	1,040	1,269	1,482	1,682	1,885
30	0,784	0,950	1,214	1,444	1,656	1,864
40	0,586	0,848	1,158	1,406	1,633	1,843
60	—	0,557	1,040	1,334	1,583	1,809
80	—	—	0,926	1,267	1,541	1,782
100	—	—	—	1,209	1,505	1,760

Таблица 6.15

Отношение PV/P_0V_0 для этилена C_2H_4

$P, \text{ атм}$	Температура, °C							
	0	20	40	60	80	100	137,5	198,5
0	1,0073	1,081	1,155	1,229	1,302	1,376	1,514	1,739
50	0,176	0,629	0,814	0,954	1,077	1,192	1,374	1,652
100	0,310	0,360	0,470	0,668	0,846	1,005	1,247	1,580
150	0,441	0,485	0,550	0,649	0,776	0,924	1,178	1,540
200	0,565	0,610	0,669	0,744	0,838	0,946	1,174	1,537
300	0,806	0,852	0,908	0,972	1,048	1,133	1,310	1,628
400	1,036	1,084	1,140	1,202	1,272	1,356	1,510	1,790
500	1,255	1,307	1,367	1,431	1,500	1,577	1,721	1,985
600	1,472	1,525	1,586	1,652	1,721	1,795	1,938	2,191
700	1,683	1,737	1,799	1,867	1,936	2,011	2,153	2,399
800	1,888	1,946	2,010	2,077	2,179	2,294	2,368	2,606
900	2,090	2,153	2,217	2,286	2,359	2,434	2,585	2,810
1000	2,289	2,356	2,421	2,492	2,566	2,642	2,798	—

6.2. ЖИДКОСТИ

Таблица 6.16

Средний коэффициент сжимаемости воды χ , 10^{-6} атм^{-1} [2]

Интервал давлений $P_1-P_2, \text{ атм}$	Температура, °C												
	0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1—25	52,5	—	50,0	—	49,1	—	—	—	—	—	—	—	—
25—50	51,6	—	49,2	—	47,6	—	—	—	—	—	—	—	—
1—100	51,1	49,3	48,3	47,3	46,8	46,0	44,9	44,9	45,5	46,2	—	47,8	—
100—200	49,2	47,5	46,1	45,1	44,2	43,6	42,9	42,5	42,7	43,9	—	46,8	80,7
200—300	48,0	46,2	45,3	44,3	43,4	42,9	41,4	41,3	41,5	42,5	43,6	45,9	76,9
300—400	46,6	44,9	44,1	43,3	42,4	41,4	40,7	40,2	40,6	41,1	42,2	44,6	73,1
400—500	45,5	44,4	43,0	42,2	41,5	40,7	40,4	39,9	39,4	39,8	40,8	43,4	68,2
500—600	43,8	43,0	41,8	41,1	40,4	39,2	39,0	39,0	38,8	39,1	39,9	41,6	66,0
600—700	42,9	40,9	40,5	39,8	39,4	38,7	38,2	37,7	38,3	38,0	38,7	40,7	62,7
700—800	41,8	40,7	39,8	39,0	38,8	37,5	37,4	37,1	36,9	37,4	37,8	38,9	61,3
800—900	40,6	39,3	38,9	38,0	37,3	36,8	36,2	36,2	36,3	36,6	36,8	38,2	58,9
900—1000	—	—	—	36,8	36,5	36,0	35,3	35,3	36,0	36,1	36,2	37,1	56,5

Средний коэффициент сжимаемости жидкостей [1—4]

Таблица 6.17

Название	Формула	Давление, атм	Температура, °С	$10^{-8} \chi_{\text{атм}^{-1}}$
Анилин	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$	85,5	25	43,2
		181,5	25	40,5
		281,5	25	38,3
		390	25	36,1
Ацетон	$(\text{CH}_3)_2\text{CO}$	1—500	0	82
		500—1000	0	59
		1000—1500	0	47
		1500—2000	0	40
		8,9—36,5	14,2	111
		8,9—36,5	99,5	276
Бензол	C_6H_6	0,14—18	12,9	87
		1—4	15,4	87
		2—8	34,9	100
		4,5—19	99,9	190
		98,7—296	20	78,7
		296—494	20	67,5
		8	17,9	91,9
		0—98,7	20	51,0
Бромформ	CHBr_3	98,7—197,4	20	47,5
		197,4—296	20	44,0
		296—395	20	42,0
		395—494	20	41,0
		0—1	23	159
Гексан	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}_3$	0—1	23	134
Гептан	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{CH}_3$	0—1	23	134
Глицерин	$\text{CHON}(\text{CH}_2\text{OH})_2$	1—10	14,8	22,1
			20,5	25,1
Декан	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{CH}_3$	0—1	23	105
Дифениламин	$(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{NH}$	0—500	65	57
		0—300	100	64
		0—100	185	110
		—	16,5	69,6
Керосин				
Кислота: капроновая	$\text{C}_5\text{H}_{11}\text{COOH}$	20—400	30	68
		20—100	65	90
		20—200	100	109
		20—100	65	90
пальмитиновая	$\text{C}_{15}\text{H}_{31}\text{COOH}$	20—300	185	134
		20—400	310	220
		1—16	0	302,5
		92,5	25	81,4
серная уксусная	H_2SO_4 CH_3COOH	218,5	25	72,6
		494	25	57,1
		98,7—296	20	71,3
Кумол (изопропилбензол)	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}(\text{CH}_3)_2$	296—494	20	61,2
Масло: прованское парафиновое оливковое	—	—	20,5	63,28
		—	14,8	62,67
		—	20	63
		—	20	63
Мезэтилен (1,3,5-триметилбензол)	$\text{C}_6\text{H}_3(\text{CH}_3)_3$	98,7—296	20	68,4
		296—494	20	59,1
Нитробензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	86,5	25	46,1
		192	25	43,0
		303	25	40,1
		419	25	38,1
Октан	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{CH}_3$	0—1	23	121
		20—100	64	83
		20—400	100	24
		20—400	185	137
		20—400	310	236
		1—29	0	174
Пентан	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{CH}_3$	1—29	20	242
		0	0	175,9
		484	0	94,6
		967	0	68,9
Пропилбензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{C}_3\text{H}_7$	98,7—296	20	70,7
		296—494	20	61,0

Название	Формула	Давление, атм	Температура, °C	$10^{-8} \gamma, \text{атм}^{-1}$
Псевдонумол (1,2,4-триметил-бензол)	$\text{C}_6\text{H}_3(\text{CH}_3)_3$	98,7—296	20	65,2
Сероуглерод	CS_2	296—494	20	56,9
		1—2	20	80,95
		1—500	0	66
		500—1000	0	53
		1000—1500	0	43
		1500—2000	0	37
		2000—2500	0	33
Спирт:				
аллиловый	$\text{CH}_2=\text{CHCH}_2\text{OH}$	1—500	9,6	69
		500—1000	9,6	51
		1000—1500	9,6	43
		1500—2000	9,6	36
амиловый	$\text{C}_4\text{H}_9\text{CH}_2\text{OH}$	8	17,7	90,5
бутиловый	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{CH}_2\text{OH}$	8	17,95	98
изопропиловый	$(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$	8	5,6	89,5
		8	17,85	103
метиловый	CH_3OH	1—500	0	79,4
		500—1000	0	58,3
		1000—1500	0	47
		1500—2000	0	40
		2000—2500	0	29
		8,5—37,1	14,7	104
		8,7—37,3	100	221
пропиловый	$\text{C}_2\text{H}_5\text{CH}_2\text{OH}$	1—500	0	69
		500—1000	0	52
		1000—1500	0	42
		2500—3000	0	27
этиловый	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$	1—50	0	96
		100—200	0	85
		300—400	0	73
		500—600	0	64
		600—700	0	60
		900—1000	0	52
		1—50	20	112
		50—100	20	102
		100—200	20	95
		200—300	20	86
		300—400	20	80
		400—500	20	73
		500—600	20	69
		150—400	28	81
		1—50	40	125
		150—400	65	100
		150—400	100	132
		150—400	185	245
		150—400	310	1530
Тимол (5-метил-2-изопропил фенол)	C_3H_7 $\text{CH}_3 \diagup \text{C}_6\text{H}_3\text{OH}$	200—100	64	69
		20—400	64	66
		20—400	100	80
		20—400	310	268
n-Толуидин	$\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_4\text{NH}_2$	1—150	45	51,2
		20—100	28	56
		20—400	100	77
		20—400	185	112
		20—400	310	243
Углерод четыреххлористый	CCl_4	1—5,25	10	70
		0—98,7	20	91,6
		98,7—197,4	20	89,9
		197,4—296	20	83,5
		296—396	20	75,5
		395—494	20	69,9
		542,5	20	62,5
		664	20	55,0

Название	Формула	Давление, атм	Температура, °C	$10^{-6} \chi, \text{ атм}^{-1}$
Углерода двуокись	CO_2	60	13	1740
		70	13	960
		80	13	660
		90	13	440
Фторбензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{F}$	1—18,5	13,9	87,7
Хлорбензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	0,4—18	13,3	67
		0,4—18	35	77
		1—2	80	108,4
		0,4—18	100	127
Хлороформ	CHCl_3	1—2	0	87,27
		0—98,7	20	94,9
		98,7—197,4	20	89,8
		197,4—296,1	20	80,1
		296,1—395	20	72,9
		395—494	20	67,8
		1—2	60	139,13
		8—9	100	211
		19—34	100	206
Этил: бромистый	$\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$	1—500	10,1	80
		500—1000	10,1	63
		1000—1500	10,1	50
		2000—2500	10,1	36
иодистый	$\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$	1—18,5	13,7	113,4
		1—500	10,6	74
		500—1000	10,6	56
		1000—1500	10,6	46
хлористый	$\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$	1500—2000	10,6	38
		2000—2500	10,6	34
		1—500	0	103
		500—1000	0	69
		1000—1500	0	55
		2000—2500	0	39
		8,7—37,22	15,2	153
		12,77—34,47	99	465
Этилен: бромистый	$\text{C}_2\text{H}_4\text{Br}_2$	1—5,25	10	55,8
		1—5,25	64	76,6
хлористый	$\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$	1—5,25	10	67,7
		1—5,25	75	111,1
Эфирбензол: побутиловый (бутилбензоат) валериановобутиловый (бутилвалериат) валериановометиловый (метилвалериат) диэтиловый (этиловый)	$\text{C}_6\text{H}_5\text{COOC}_4\text{H}_9$	1—5,25	10	59
	$\text{C}_4\text{H}_9\text{COOC}_4\text{H}_9$	1—5,25	10	92
	$\text{C}_4\text{H}_9\text{COOCH}_3$	1—5,25	10	91
	$(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$	1000	—100,8	34,5
		100	0	125,7
		200	0	112,2
		500	0	84,5
		1000	0	63,5
		1—8	8,1	163,8
		0,4—17,5	12,2	163
		8,43—25,4	13,5	169
		2—19	34,8	207
		1—2000	35	42,5
		8,6—34,3	63	293
		8,6—34,3	78,5	363
		8,6—36,5	99	523
маслянобутиловый (бутил- бутират)	$\text{C}_8\text{H}_7\text{COOC}_4\text{H}_9$	100—200	185	741
		100—400	185	478
		1—5,25	10	90

Название	Формула	Давление, атм	Температура, °C	$10^{-6} \chi, \text{ атм}^{-1}$
маслянометиловый (метил-бутират)	$\text{C}_3\text{H}_7\text{COOCH}_3$	1—5,25	10	89
уксуснометиловый (метилацетат)	$\text{CH}_3\text{COOCH}_3$	8,1—37,53	14,3	97
уксусноэтиловый (этилацетат)	$\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$	8,12—37,45 8,13—37,15	13,3 99,6	104 250

6.3. ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

Таблица 6.18

Коэффициент сжимаемости твердых тел при температуре 20°C [3]

Элемент	$\chi, 10^{-6} \text{ атм}^{-1}$	Элемент	$\chi, 10^{-6} \text{ атм}^{-1}$	Элемент	$\chi, 10^{-6} \text{ атм}^{-1}$	Элемент	$\chi, 10^{-6} \text{ атм}^{-1}$	Элемент	$\chi, 10^{-6} \text{ атм}^{-1}$	Элемент	$\chi, 10^{-6} \text{ атм}^{-1}$
Алюминий	1,38	Калий	32,4	Молибден	0,47	Ртуть	4,05	Таллий	2,33		
Бром	52,45	Кальций	5,87	Мышьяк	4,56	Рубидий	40,5	Углерод:			
Висмут	3,04	Кремний	0,324	Натрий	15,99	Свинец	2,23	алмаз	0,23	Хром	0,91
Железо	0,597	Литий	9,1	Никель	0,63	Селен	12,15	графит	3,04	Цезий	62,77
Золото	0,617	Магний	2,89	Олово	1,82	Сера	13,16	Фосфор:			
Иод	13,6	Марганец	0,86	Палладий	0,56	Серебро	1,01	белый	20,75	Цинк	1,72
Кадмий	2,13	Медь	0,74	Платина	0,385	Сурьма	2,43	красный	9,31		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Handbook of Chemistry and Physics. 33rd ed., Cleveland, Ohio s. a.
2. Справочник химика. Т. 1. М., 1962, с. 572—579.

3. Кэй Д., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. Пер. с англ. Под ред. К. П. Яковлева М., Физматгиз, 1962, с. 40—41.
4. Бачинский А. И., Путилов В. В., Суворов Н. П. Справочник по физике. М., Учпедгиз, 1951.

ГЛАВА 7

АКУСТИКА

Скорость звука в газе можно рассчитать по формуле

$$v = \sqrt{(C_p/C_v)(P/\rho)},$$

где C_p/C_v — отношение удельных теплоемкостей при постоянных давлении и объеме; P — давление; ρ — плотность газа;

в жидкости

$$v = 1/\sqrt{\beta \cdot \rho},$$

где β — коэффициент адиабатического сжатия.

В твердом теле скорость продольных волн

$$v_{||} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{1-\sigma}{1+\sigma} \cdot \frac{1}{1-2\sigma}},$$

где E — модуль Юнга; σ — коэффициент Пуассона; скорость поперечных волн

$$v_{\perp} = \sqrt{E/\rho} \cdot \sqrt{1/[2(1+\sigma)]};$$

скорость звука в тонком стержне

$$v = \sqrt{E/\rho}.$$

Поглощение звуковых волн в веществе характеризуется коэффициентом

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{A_0}{A_d},$$

где A_0 — первоначальная амплитуда плоской волны; A_d — амплитуда волны на расстоянии d . Коэффициент поглощения звука в газе и жидкости связан с вязкостью и коэффициентом теплопроводности среды выражением:

$$\alpha = \frac{2\pi^2 f^2}{v^3 \rho} \left(\frac{4}{3} \eta + \frac{\gamma - 1}{C_p} \kappa \right),$$

где f — частота; v — скорость звука; η — динамический коэффициент вязкости; κ — коэффициент теплопроводности.

Коэффициент поглощения α измеряется в нпн/см (см^{-1}); для пересчета в дб/м значение α в нпн/см нужно умножить на 868,6. В качестве характеристики поглощения часто пользуются не зависящим от частоты отношением α/f^2 . Мерой поглощения на расстоянии одной длины волны является произведение $\alpha\lambda$.

В твердых телах мерой затухания звука является коэффициент потерь ϵ , при этом $\alpha = \epsilon\pi/\lambda$. Затухание звука в твердых телах характеризуют также добротностью Q . В случае продольных колебаний в стержнях $\alpha = \pi f/(Qv)$.

Таблица 7.1

Скорость звука в газах и парах

Вещество	Температура, $t, ^\circ\text{C}$	Частота $f, \text{кГц}$	Скорость $v, \text{м/сек}$	$\Delta v/\Delta t, \frac{\text{м}}{\text{сек} \cdot \text{град}}$	Литература
Азот	0	—	334,0	0,6	[1]
	19,1	—	349,0	—	[2]
Аргон (рис. 7.1, 7.2)	0	—	319,0	0,56	[1]
	20	—	321	—	[2]
	30,20	83,780	325,23	—	[3]
Аммиак	0	—	415	—	[1]
	18	—	428,2	—	[2]
Амиловый спирт	136	—	218,8	—	[2]
Ацеталь	30	59,6	257	—	[2]
Ацетон	18	—	327	—	[2]
	97	—	239	0,32	[4]
	134	—	251,2	—	[4]
Бензол	97,1	—	202	0,3	[5]
	134	95	212,6	—	[2]
Бромистый водород	0	—	200	—	[5]
Бром	0	—	135	—	[2]
Бутиловый спирт:					
вторичный	134	95	215	—	[2]
третичный	134	95	180	—	[2]
Воздух (рис. 7.3)	0	—	331,45	—	[6]
	30,40	83,780	350,70	—	[3]
Водород (рис. 7.4, 7.5)	0	—	1284	2,2	[1]
	18	—	1301	—	[2]
	100	—	1463	—	[2]
Водяной пар	134	—	494	—	[5]
Винилацетат	134	—	203	—	[2]
Гелий	0	—	965	0,8	[1]
	29,99	83,780	1055,63	—	[3]
Гексан	134	94	199,6	—	[2]
Дейтерий	0	—	190	1,6	[5]
Двуокись серы	0	—	213	0,47	[2]
	18	—	216,2	—	[2]
Диметилловый эфир	97,1	—	274	—	[5]
Дипропиловый эфир	97,1	—	194	—	[5]
Дихлорэтан	97,1	—	181	0,24	[5]
	134	—	190	—	[5]
Диэтиловый эфир	97,1	—	206	0,3	[5]
	134	—	217	—	[5]
Закись азота	0	—	263	0,5	[5]
Иодистый водород	0	—	157	—	[2]
Иодистый этил	76	465	162	—	[2]
Иодистый метил	43	465	154	—	[2]
Иод	0	—	108	—	[2]
Изопропиловый спирт	97,1	95	255	0,4	[2]
	134	95	270,2	—	[2]
Кислород	0	42,3	314	—	[1]
Криптон	30,26	83,780	224,36	—	[3]
Метан	0	—	430	—	[5]
Метиловый спирт	97,1	95	335	0,46	[2]
	134	—	352,2	—	[2]
Метилциклогексан	134	—	185	—	[2]
Метиловый эфир	97,1	95	273,9	—	[2]
Неон	0	—	433,4	—	[1]
	30,46	83,780	461,29	—	[3]
Окись азота	0	—	324	—	[2]
	16	—	332,4	—	[2]
Окись углерода	0	—	337	0,6	[2]
Пентан	134	—	220	—	[2]

Вещество	Температура $t, ^\circ\text{C}$	Частота $f, \text{кГц}$	Скорость $v, \text{м/сек}$	$\Delta v/\Delta t, \frac{\text{м}}{\text{сек} \cdot \text{град}}$	Литература
Пропиловый спирт	134	95	244,5	—	[2]
Пропионовая кислота	146	—	232	—	[2]
Пропиловый эфир	97,1	50	194	—	[2]
Сероуглерод	97,1	50	220,1	—	[5]
	55	59,5	205	—	[2]
Сероводород	0	—	289,3	—	[5]
Светильный газ	0	—	453	—	[5]
Углекислый газ (рис. 7.6)	0	43,2	256,7	—	[2]
	20	58,5	274,6	—	[2]
Фтористый кремний	0	—	167	—	[5]
Хлор	0	—	206	—	[2]
Хлористый водород	0	—	296	—	[2]
Хлористый метилен	97,1	95	204	0,24	[5]
	134	95	213	—	[5]
Хлористый этил	18	—	428,2	—	[2]
Хлороформ	97,1	95	171	0,24	[5]
	134	95	179,7	—	[2]
Циклогексан	97,1	—	191	0,3	[5]
	134	95	201,9	—	[2]
Четыреххлористый углерод	97,1	95	145	—	[5]
Четырехфтористый углерод	134	—	153,6	—	[2]
	22	—	178,2	—	[2]
Этан (рис. 7.7)	10	—	308	—	[5]
Этилацетат	97,1	—	189	0,27	[5]
	134	95	198,8	—	[5]
Этилен	0	—	317	—	[5]
	20	59,5	329	—	[2]
Этилметилкетон	134	—	223	—	[5]
Этиловый спирт	97,1	95	269	0,4	[2]
	134	95	284	—	[2]
Этиловый эфир	97,1	—	206	0,3	[2]
	134	—	217	—	[2]

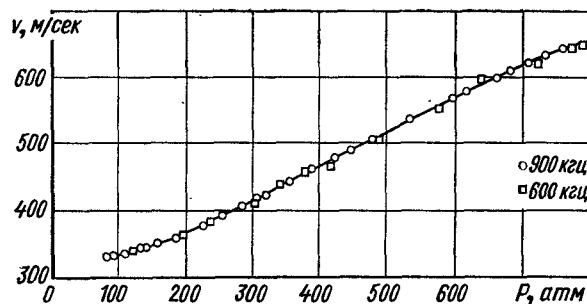


Рис. 7.1. Зависимость скорости звука в аргоне от давления [9].

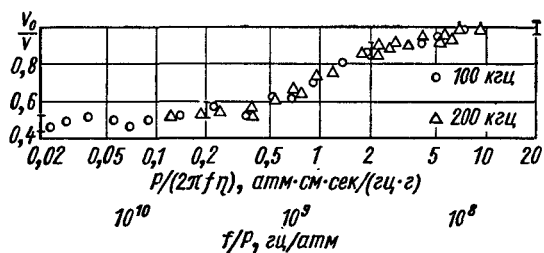


Рис. 7.2. Дисперсия звука в аргоне [v_0 — скорость звука при низких (звуковых) частотах] [10].

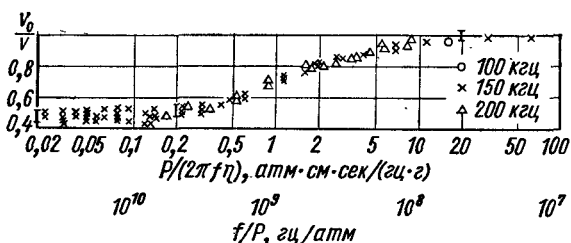


Рис. 7.3. Дисперсия звука в воздухе [10].

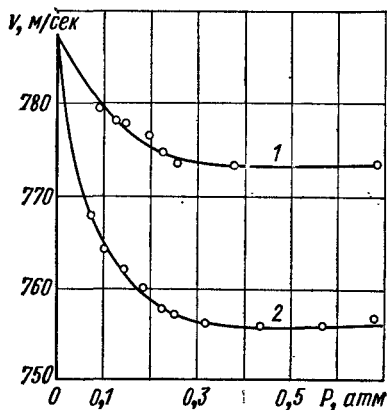


Рис. 7.4. Зависимость скорости звука в водороде ($T = 90,3^\circ \text{K}$) от давления [11]:

1 — в нормальном водороде; 2 — в водороде, содержащем 70% параводорода.

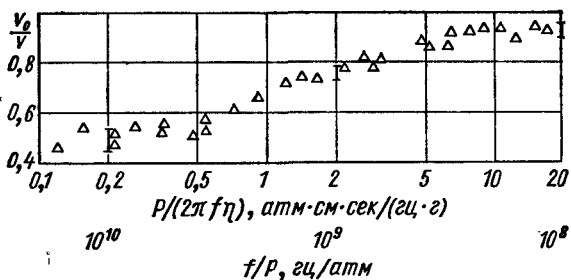


Рис. 7.5. Дисперсия звука в водороде при $f = 200 \text{ кГц}$ [10].

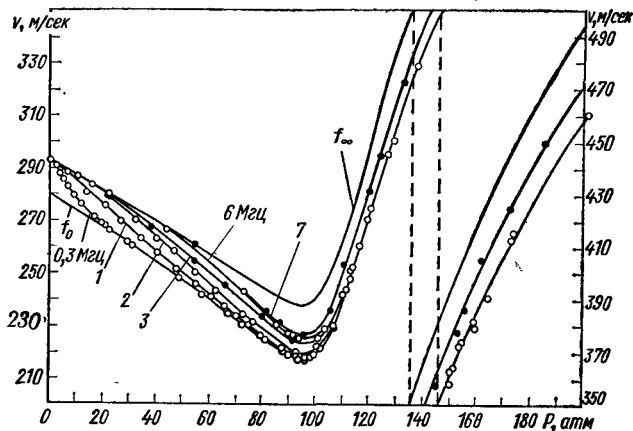


Рис. 7.6. Зависимость скорости звука в углекислом газе ($t = 50,8^\circ \text{C}$) от давления (f_0 — низкие и f_∞ — высокие частоты) [12].

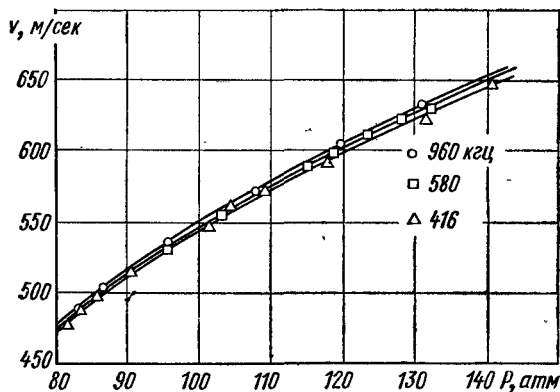


Рис. 7.7. Зависимость скорости звука в этане от давления при различных частотах [9].

Коэффициент поглощения звука α в газах и парах

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$f, \text{кГц}$	$P, \text{атм}$	$\alpha, \text{см}^{-1}$	$\frac{\alpha/f^2}{10^{-12} \frac{\text{сек}^2}{\text{см}}}$	Литература
Азот	19,9	598,9	0,97	—	1,35	[4]
Аргон (рис. 7.8, 7.9)	20	4250	1	—	1,9	[4]
	—	500	0,574	0,0834	—	[8]
	—	500	0,477	0,0930	—	[8]
	—	500	0,329	0,138	—	[8]
	—	500	0,224	0,212	—	[8]
	—	500	0,182	0,255	—	[8]
Ацетон	—	97,8	—	0,5	—	[2]
Бензол	—	97,8	—	1,0	—	[2]
Водород (рис. 7.10)	19,9	598,9	1	—	3,58	[4]
Воздух (рис. 7.11, 7.12)	—	—	—	0,697	1,85	[7]
Гелий (см. рис. 7.9)	17,5	598,9	0,99	—	2,96	[4]
Иодистый метил	—	97,8	—	0,15	—	[2]
Иодистый этил	—	97,8	—	0,45	—	[2]
Кислород	19,6	598,9	0,99	—	1,68	[4]
Ксенон	—	500	0,544	—	0,15	[8]
	—	500	0,243	—	0,345	[8]
	—	500	0,090	—	0,930	[8]
Метиловый спирт	—	97,8	—	0,05	—	[2]
Неон	19	304,4	0,65	—	5,82	[4]
Оксись азота	16,3	598,9	0,95	—	1,83	[4]
Оксись углерода	18,7	304,4	0,85	—	5,78	[4]
Сероуглерод	—	97,8	—	1,2	—	[2]
Углекислый газ	16,6	304,4	0,98	—	27,1	[4]
Хлористый метилен	—	97,8	—	0,7	—	[2]
Хлороформ	—	97,8	—	0,7	—	[2]
Четыреххлористый углерод	—	97,8	—	0,35	—	[2]
Этиловый спирт	—	97,8	—	0,7	—	[2]
Этиловый эфир	—	97,8	—	0,2	—	[2]

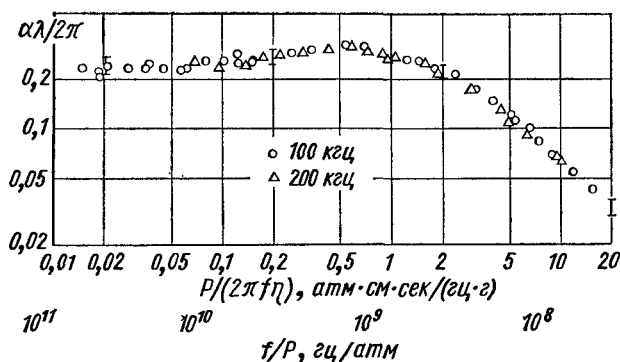
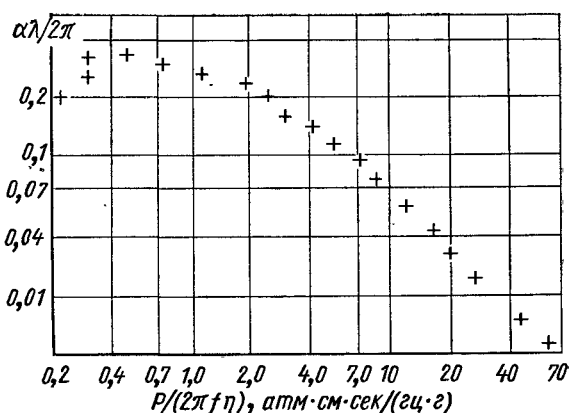


Рис. 7.8. Зависимость коэффициента поглощения звука в аргоне от давления [10].

Рис. 7.9. Зависимость коэффициента поглощения звука в инертных газах (He, Ar, Ne, Kr, Xe) от давления при $f = 11 \text{ МГц}$ [13].

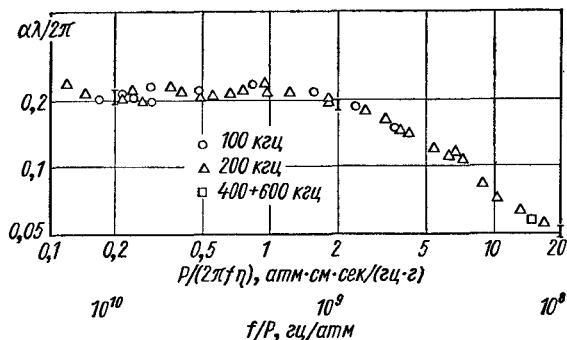


Рис. 7.10. Зависимость коэффициента поглощения звука в водороде от давления [10].

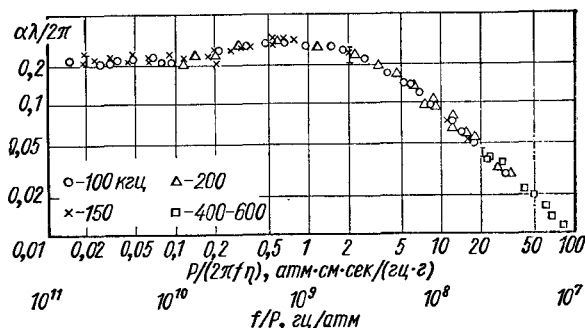


Рис. 7.11. Зависимость коэффициента поглощения звука в воздухе от давления [10].

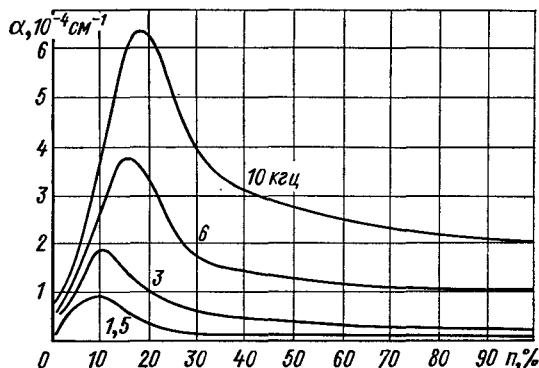


Рис. 7.12. Зависимость коэффициента поглощения звука в воздухе от содержания водяных паров при различных частотах [2].

7.2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ЖИДКОСТЯХ

Таблица 7.3

Скорость звука в сжиженных газах

Вещество	T, °K	f, Мгц	$v, \frac{м}{сек}$	$\frac{\Delta v / \Delta t, \frac{м}{сек \cdot град}}{м}$	Литература	Вещество	T, °K	f, Мгц	$v, \frac{м}{сек}$	$\frac{\Delta v / \Delta t, \frac{м}{сек \cdot град}}{м}$	Литература
Азот	65	—	1007	—	[1]	Гелий (рис. 7.13)	0,985	—	237,66	—	[18]
	70	1,5—7,5	929	—	[4]		1,08	—	237,67	—	[18]
	71	—	937	—	[1]		1,76	—	231,4	—	[17]
	73,9	44,4	962	—10	[14]		2,18	—	221,7	—	[17]
	76	1,5—7,5	869	—	[4]		2,5	—	223,3	—	[17]
Аргон	77	—	867	—	[1]	Гелий II	3,0	15	220	—	[19]
	64	1,5	1322	—	[15]		4,22	16	179,8	—21,5	[17]
	78	1,5	1255	—	[15]		4,223	0,220	180,63	—	[18]
	84	1,5—7,5	863	—	[4]		1,63	—	20	—	[20]
	84,0	—	780	—	[1]		2,18	—	3,4	—	[20]
Водород	85,2	44,4	853	—	[1]	Кислород	53	—	1130	—	[21]
	87	1,5—7,5	837	—	[4]		60	44,8	1119	—	[14]
	14,8	0,527	1340	—	[16]		70	44,4	1094	—	[14]
	16,5	0,523	1265	—	[16]		75	—	1029	—	[1]
	17	44,4	1187	—	[1]		80	—	988	—	[1]
	17,4	0,523	1278	—	[16]		85	—	948	—	[1]
	18,0	0,523	1260	—	[16]	Метан (рис. 7.14)	87	44,4	952	—	[16]
	20,3	—	1127	—	[4]		90,1	44,4	912	—6,9	[8]
	20,4	0,523	1229	—	[16]		94,9	—	1545	—	[22]
	21,0	0,523	1150	—	[16]		111,4	—	1418	—	[22]

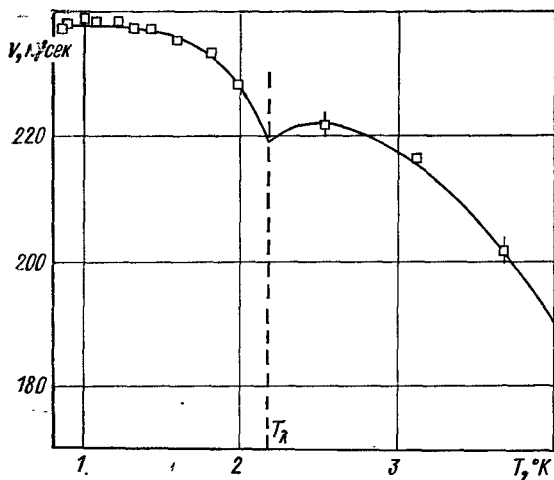


Рис. 7.13. Зависимость скорости звука в жидком гелии от температуры; при температуре T_λ происходит переход обыкновенного гелия He I в сверхтекучее состояние He II [23].

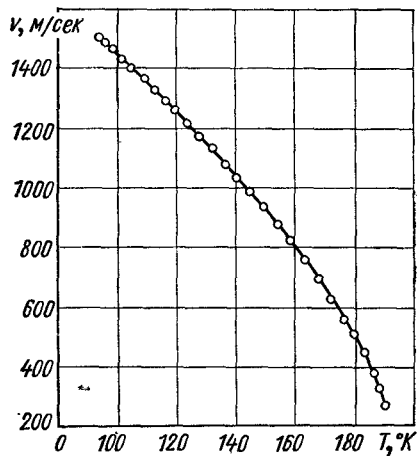


Рис. 7.14. Зависимость скорости звука в жидком метане от температуры [24].

Таблица 7.4

Коэффициент поглощения звука в сжиженных газах

Вещество	$T, ^\circ\text{K}$	$f, \text{Мгц}$	$\frac{\alpha}{f^2}, 10^{-17} \frac{\text{сек}^2}{\text{см}}$	Литература
Азот	73,9	44,4	10,5	[9]
Аргон	85,2	44,4	10,1	[9]
Водород	17	44,4	5,6	[9]
Гелий (рис. 7.15)	3	15	110	[19]
Кислород	60	44,4	8,6	[9]
	70	44,4	8,6	[9]
	88	44,4	8,6	[9]

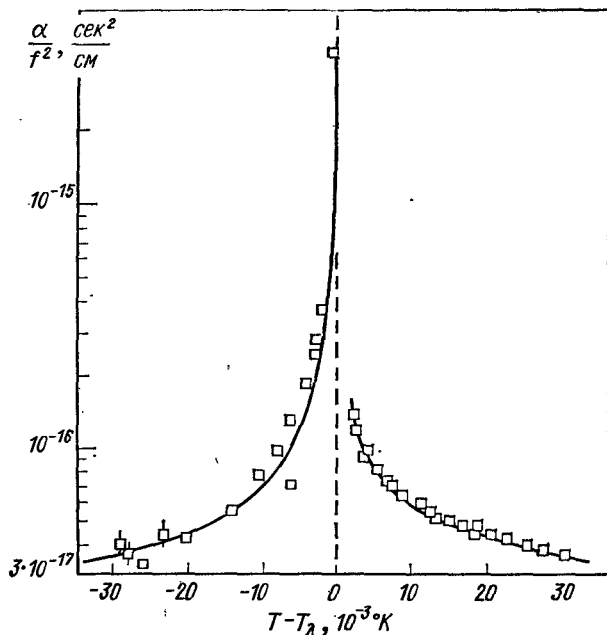


Рис. 7.15. Зависимость коэффициента поглощения звука в жидком гелии от температуры [23].

Таблица 7.5
Скорость звука в жидких и газообразных веществах, м/сек [25]

Вещество	$T, ^\circ\text{K}$	В жидкости	В газе
Азот	71,9	940	171
	78,0	859	176
	78,4	856	177
	79,2	848	177
Аргон	84,0	875	167,5
	85,8	857	169
	19,9	1140	355
Водород	17,2	1210	320
	18,6	1174	340
	20,4	1128	362
Гелий	3,8	198	102
	4,2	181	104
Кислород	78,4	1007,6	106,8
	82,8	966,8	171,3
	86,5	938,3	173,5
	90,3	917,7	177,7

Таблица 7.6

Продолжение табл. 7. 6

Скорость звука в жидкостях

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$v, \frac{м}{сек}$	$\frac{\Delta v}{\Delta t}, \frac{м}{сек \cdot град}$	Лите- ратура
Акролеин	20	1207	—	[26]
Аллил хлористый	28	1088	—	[27]
Амиллацетат	26	1168	—	[27]
Амил бромистый	20	981	—3,6	[26]
Амиловый спирт	20	1294	—	[26]
Амиловый спирт третич- ный	28	1204	—	[27]
Амилформиат	26	1201	—	[27]
Анилин	20	1656	—4,6	[26]
Ацеталь	24	1378	—	[27]
Ацетилацетон	20	1383	—5,2	[26]
Ацетил хлористый	20	1060	—	[26]
Ацетон	20	1192	—5,5	[26]
	22,5	1178	—	[28]
	24,0	1168	—	[28]
Ацетилацетон	20	1416	—4,8	[26]
Ацетонитрил	20	1304	—5,0	[26]
Ацетоуксусный эфир	25,5	1417	—	[27]
Ацетофеион	20	1496	—3,7	[27]
Бензальдегид	20	1479	—4,0	[26]
Бензилацетон	20	1514	—	[26]
Бензиловый спирт	20	1540	—	[26]
Бензил хлористый	20	1420	—4,6	[26]
Бензонл хлористый	28	1318	—	[27]
Бензол	20	1321	—4,58	[29]
	40	1227	—	[29]
Бензол тяжелый	20	1238	—4,25	[29]
	40	1151	—	[29]
Бромаль	20	966	—3,4	[26]
α -Бромнафталин	20	1372	—3,1	[30]
Бромформ	20	928	—2,1	[27]
Бутилацетат	26	1271	—	[27]
Бутил: бромистый	20	990	—4,0	[26]
иодистый	20	977	—3,6	[26]
хлористый	20	1133	—4,6	[26]
2,3-Бутиленгликоль	25	1484	—	[31]
Бутиловый спирт	20	1268	—4,0	[26]
Бутиловый спирт третич- ный	20	1155	—5,0	[26]
Бутилформиат	24	1199	—	[27]
Валериановая кислота	20	1244	—4,8	[26]
Вода обычная (рис. 7.16, 7.17)	25	1497	+2,5	[32]
	74	1555	—	[33]
Вода тяжелая	25	1399	+2,8	[32]
Гексан	20	1083	—	[26]
Гексил: иодистый	20	1081	—3,2	[26]
хлористый	20	1221	—4,2	[26]
Гексиловый спирт	20	1322	—3,9	[26]
Гемеллитол	20	1372	—	[26]
Гептан	20	1162	—4,5	[26]
Гептаион	20	1207	—	[26]
1-Гептен	20	1128	—	[34]
Гептиловый спирт	20	1341	—4,2	[26]
Геранилацетат	28	1328	—	[27]
Гидриден	20	1403	—	[26]
Глицерин	20	1923	—1,8	[30]
	22	1927	—	[28]
1-Децен	20	1250	—	[34]
Дециловый спирт	20	1413	—	[35]
Децил хлористый	20	1318	—4,2	[26]
Диамидовый эфир	26	1153	—	[27]
Дибромэтилен	20	1009	—	[26]
Диацетил	25	1236	—4,5	[31]
<i>цис</i> -Дибромэтилен	20	957	—2,4	[36]
<i>транс</i> -Дибромэтилен	20	936	—2,2	[36]
Диметиланили	20	1509	—3,6	[26]
Диметиловый эфир:				
адипиновой кислоты	21,8	1469	—	[27]
диметилглутаровой кис- лоты	24	1371	—	[27]
резорцина	26	1460	—	[27]
Диоксан	20	1389	—6,2	[26]
Дипентен	23,8	1328	—	[27]
Дипропиловый эфир	20	1112	—	[26]
Дифенилметан	28	1501	—	[27]
Дифениловый эфир	24	1469	—	[27]
<i>m</i> -Дихлорбензол	28	1232	—	[27]
<i>o</i> -Дихлорбензол	20	1295	—	[27]
Дихлорэтан	20	1034	—4,6	[26]
	23	1240	—	[27]
<i>цис</i> -Дихлорэтилен	20	1090	—3,7	[36]
<i>транс</i> -Дихлорэтилен	20	1031	—3,7	[36]
Диэтиланилин	20	1482	—4,0	[26]
Диэтиленгликоль	25	1586	—2,4	[31]
Диэтилкарбонат	28	1173	—	[27]
Диэтилкетон	24	1314	—	[27]
Диэтиловый эфир	20	1008	—5,4	[26]
Диэтиловый эфир:				
адипиновой кислоты	22	1376	—	[27]
ацетодикарбоиновой кислоты	22,5	1348	—	[27]
дигликолевой кислоты	22	1435	—	[27]
малоновой кислоты	22	1386	—	[27]
тиодигликолевой кисло- ты	22,5	1449	—	[27]
щавелевой кислоты	22	1392	—	[27]
яитарной кислоты	22	1378	—	[27]
Диэтилфталат	23	1471	—	[27]
Додециловый спирт	22,3	1433	—	[35]
Изобутиловый спирт	20	1278	—	[35]
Изопропилбензол	20	1342	—	[26]
Изопропиловый спирт	20	1247	—	[35]
Инден	20	1475	—	[26]
Иодистый бензол	20	1113	—	[26]
α -Ионон	20	1432	—	[26]
Каприловая кислота	20	1331	—5,0	[26]
Капроновая кислота	20	1281	—	[35]
Карвакрол	20	1475	—5,0	[26]
Кориичный альдегид	25	1554	—3,1	[31]
<i>o</i> -Крезол	25	1506	—3,5	[31]
Кротоновый альдегид	20	1344	—4,0	[26]
<i>m</i> -Ксилол	20	1340	—4,1	[26]
<i>o</i> -Ксилол	20	1360	—4,1	[26]
<i>p</i> -Ксилол	20	1330	—4,8	[26]
Линалоол	20	1341	—	[26]
Малениовая кислота	20	1352	—3,8	[26]
Масляная кислота	20	1234	—	[35]
Мезитилен	20	1362	—4,8	[26]
<i>N</i> -Метиланилин	20	1586	—	[26]
Метилацетат	25	1154	—3,8	[32]
2-Метилбутанол	30	1225	—	[37]
Метилгексалин	22,5	1528	—	[27]
Метилгексилкетон	24	1324	—	[27]
Метилен бромистый	24	971	—	[27]

Продолжение табл. 7.6

	$t, ^\circ\text{C}$	$v, \frac{\text{м}}{\text{сек}}$	$\frac{\Delta v}{\Delta t}$ $\frac{\text{м}}{\text{сек} \cdot \text{град}}$	Лите- ратура
Метилен:				
иодистый	24	977	-1,8	[27]
хлористый	20	1092	-4,4	[26]
<i>n</i> -Метилизопропилбензол	28	1308	—	[27]
Метил иодистый	20	834	—	[26]
Метиловый спирт	20	1156	—	[35]
Метиловый эфир				
<i>m</i> -крезола	26	1385	—	[27]
фенола	26	1353	—	[27]
хлоруксусной кисло- ты	26	1331	—	[27]
Метилпропионат	24,5	1215	—	[27]
Метилсалицилат	28	1408	—	[27]
Метилциклогексан	20	1247	-5,6	[26]
2-Метилциклогексанол	25,5	1421	—	[27]
3-Метилциклогексанол	25,5	1406	—	[27]
4-Метилциклогексанол	25,5	1387	—	[27]
2-Метилциклогексанон	25,5	1353	—	[27]
4-Метилциклогексанон	25,5	1348	—	[27]
Метилэтилкетон	20	1207	-5,0	[26]
Монометиловый эфир ре- зорцина	26	1629	—	[27]
Моноклорнафталин	27	1462	—	[27]
Морфолин	25	1442	-3,7	[31]
Муравьиная кислота	20	1401	—	[35]
Никотин	20	1491	-5,0	[26]
Нитробензол	20	1473	-3,8	[26]
Нитрометан	20	1346	-4,8	[26]
<i>m</i> -Нитротолуол	20	1489	—	[26]
<i>o</i> -Нитротолуол	20	1432	—	[26]
Нитроэтиловый спирт	20	1578	—	[26]
Новин	20	1248	-4,4	[26]
1-Ноен	20	1218	—	[34]
Новиловый спирт	20	1391	-4,3	[26]
Окись мезитила	20	1310	—	[31]
Октан	20	1197	-4,4	[26]
Октадециловый спирт	59,1	1336	—	[35]
1-Октен	20	1184	—	[34]
Октил бромистый	20	1182	-4,8	[26]
хлористый	20	1280	-4,2	[26]
Октиловый спирт	20	1381	—	[35]
<i>цис</i> -Олеиновая кислота	45	1333	-3,3	[36]
Пальметиновая кислота	62,1	1328	—	[35]
Паральдегид	20	1204	-5,0	[26]
1-Пентадецен	20	1351	—	[34]
Пентан	20	1008	-4,2	[26]
Пентахлорэтан	20	1113	—	[26]
Перхлорэтилен	20	1066	—	[26]
α -Пиколин	28	1453	—	[27]
β -Пиколин	28	1419	—	[27]
Пинеи	24	1247	—	[27]
Пиперидин	20	1400	—	[26]
Пиридин	20	1445	-4,4	[26]
Пировиноградная кислота	20	1471	—	[26]
Пропадиат	26	1182	—	[27]
Пропил иодистый	20	929	-4,0	[26]
хлористый	20	1091	-4,4	[26]
Пропиловый спирт	20	1223	-4,0	[26]
Пропионитрил	20	1271	—	[26]
Пропионовая кислота	20	1270	—	[35]
Псевдобутил- <i>m</i> -ксилол	20	1354	—	[26]
Псевдокумол	20	1368	—	[26]
Салициловый альдегид	27	1474	—	[30]
Сероуглерод	20	1158	-3,2	[27]

Продолжение табл. 7.6

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$v, \frac{\text{м}}{\text{сек}}$	$\frac{\Delta v}{\Delta t}$ $\frac{\text{м}}{\text{сек} \cdot \text{град}}$	Лите- ратура
Тетрабромэтан	20	1041	—	[30]
Тетрадециловый спирт	38,4	1404	—	[35]
Тетралин	20	1492	-4,5	[26]
Тетраинитрометан	20	1039	-4,0	[26]
Тетрахлорэтан	20	1171	—	[26]
	28	1155	—	[27]
Тетрахлорэтилен	28	1027	—	[27]
Тетраэтиленгликоль	25	1586	-3,0	[31]
Тиоуксусная кислота	20	1168	—	[26]
Тиофеи	20	1300	-4,2	[26]
<i>m</i> -Толуидин	20	1620	—	[26]
<i>o</i> -Толундин	20	1634	—	[26]
Толуол	20	1328	—	[26]
1-Тридецен	20	1313	—	[34]
Триметиленбромид	23,5	1144	—	[27]
Триолеин	20	1482	—	[26]
1, 2, 4-Трихлорбензол	20	1301	—	[26]
Трихлорэтилен	20	1049	-4,4	[26]
Триэтиленгликоль	25	1608	-3,8	[31]
Уксусный ангидрид	24	1384	—	[27]
Уксусная кислота	20	1253	—	[35]
1-Уддецен	20	1275	—	[34]
Фенилгидразин	20	1738	—	[26]
γ -Фенилпропиловый спирт	30	1523	—	[37]
β -Фенилэтиловый спирт	30	1512	—	[37]
Формамид	20	1550	—	[26]
Фумаровая кислота	20	1303	-3,5	[36]
Фуриловый спирт	25	1450	-3,5	[31]
Хиальдин	20	1575	—	[26]
Хиолин	20	1600	-4,8	[26]
Хлорбензол	20	1291	-4,4	[26]
α -Хлорифталин	20	1481	—	[26]
Хлороформ	20	1005	-3,6	[26]
<i>m</i> -Хлортолуол	20	1326	—	[26]
<i>o</i> -Хлортолуол	20	1344	—	[26]
<i>p</i> -Хлортолуол	20	1316	—	[26]
Циклогексан	20	1284	-4,0	[26]
Циклогексанол	20	1493	-4,9	[26]
Циклогексанон	20	1449	-5,4	[26]
Циклогексен	20	1305	-5,4	[26]
Циклогексилламин	20	1435	—	[26]
Циклогексил хлористый	20	1319	-4,8	[26]
Циклопентадиен	20	1421	—	[26]
Циклопентаион	24	1474	—	[27]
Цитраль	20	1442	-3,8	[26]
Четыреххлористый угле- род	20,5	924	-3,0	[26]
	58	815	—	[28]
Эвантовая кислота	20	1304	—	[35]
Элаидиновая кислота	45	1346	-3,5	[36]
Энантовая кислота	20	1312	-5,0	[26]
Этилацетат	20	1176	—	[26]
Этилбензиланилин	20	1586	—	[26]
Этилбензол	20	1338	-4,4	[26]
Этил бромистый	28	892	—	[27]
иодистый	20	869	—	[26]
Этилбутират	23,5	1171	—	[27]
Этиленгликоль	20	1616	—	[26]
Этилкаприлат	28	1263	—	[27]
Этиловый спирт	20	1165	—	[35]
	23	1155	—	[28]

Продолжение табл. 7.6

Вещество	t, °C	v, м/сек	$\Delta v/\Delta t$ м/сек·град	Литература
		сек	сек·град	
Этиловый эфир:				
диэтиленгликоля	25	1458	—	[31]
о-крезола	25	1315	—	[27]
феиола	26	1153	—	[27]
хлоруксусной кислоты	25,5	1234	—	[27]
Этилпропионат	23,5	1185	—	[27]
Этилфенилкетон	20	1498	—	[26]
Этилформиат	24	1721	—	[27]
Масла, нефтепродукты				
Акулья ворвань	32,5	1275	—	[38]
Анисовое	28	1451	—	[38]
Арахисовое	31,5	1562	—	[38]
Бензин	25	1295	—	[28]
Вербеновое	29	1323	—	[38]
Веретенное	32	1342	—	[38]
Газолиновое	34	1250	—	[38]
Гераниевое	27	1192	—	[38]
Горчичное	31,5	1825	—	[38]
Ионовое	34	1331	—	[38]
Кассиевое	28,5	1460	—	[38]
Кедровое	29	1406	—	[38]
Керосин	34	1295	—	[38]
Кокосового ореха	31,5	1490	—	[38]
Ксанторидное	29	1394	—	[38]
Кунжутное	32,5	1432	—	[38]
Куркума ароматическая	32,5	1349	—	[38]
Куркума зедоария	32	1293	—	[38]
Лавандовое	28,5	1310	—	[38]
Лимонное	29	1076	—	[38]
Линалооловое	32	1397	—	[38]
Льняное	31,5	1772	—	[38]
Оливковое	32,5	1381	—	[38]
Парафиновое	33,5	1420	—	[38]
Пачули	27,5	1266	—	[38]
Сосновое	31	1468	—	[38]
Спермацетовое	33	1210	—	[38]
Сурепное	30,8	1450	—	[38]
Терпентинное	27	1280	—	[38]
Трансформаторное	32,5	1425	—	[38]
Фенилгорчичное	27	1412	—	[27]
Эвкалиптовое	29,5	1276	—	[38]
Эфирное масло:				
померанцевой корки	29	1300	—	[38]
саидального дерева	34	1454	—	[38]

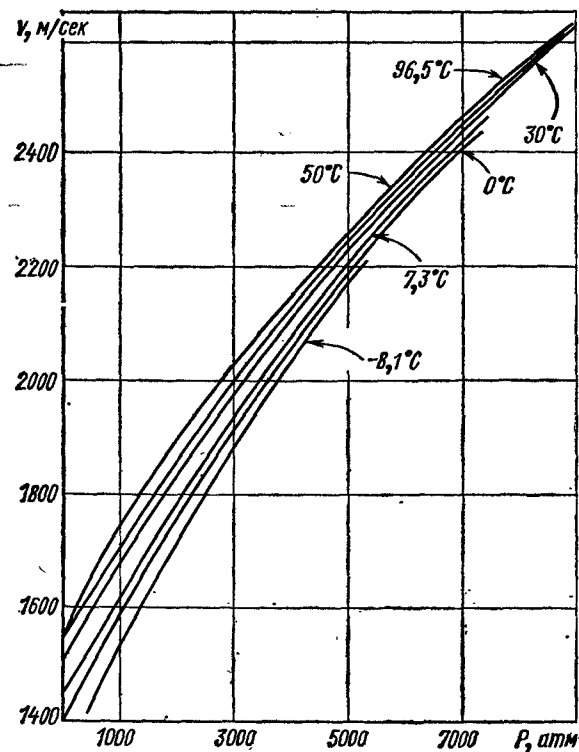
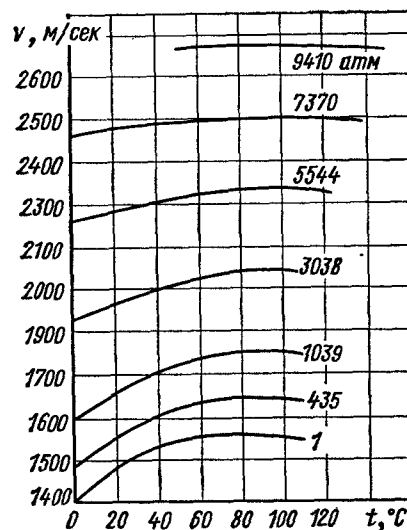
Рис. 7.16. Зависимость скорости звука в воде от давления при различной температуре ($f = 12$ МГц) [33а].Рис. 7.17. Зависимость скорости звука в воде от температуры при различных давлениях ($f = 12$ МГц) [33а].

Таблица 7.7

Коэффициент поглощения звука в жидкостях

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$f, \text{Мгц}$	$\alpha/1^2, 10^{-12} \frac{\text{сек}^2}{\text{см}}$	Литература
Аллиловый спирт	24,8	104,1	44,1	[39]
	24,8	192,0	45,4	[39]
Амиловый спирт	24,8	104,9	97,0	[39]
	24,8	192,0	96,5	[39]
	24,9	148,0	97,2	[39]
	29	15	106	[39]
Изоамиловый спирт	24,5	148,1	133	[39]
	24,8	192,0	131	[39]
	25,2	107,4	131	[39]
o-Анизидин	24,8	104,3	58,8	[39]
Анизол	24,8	104,0	43,8	[39]
Анисальдегид	24,6	104,1	63,6	[39]
Ацеталь	24,6	104,1	56,7	[39]
	24,6	192,1	43,5	[39]
Ацетил хлористый	24,6	104,0	82,8	[39]
Ацетон	20	307	27,2	[44]
	20	482	24,1	[44]
	20	843	23,6	[44]
	24,4	104,3	25,7	[39]
	25	1—4	70	[31]
Бензил хлористый	24,6	104,1	78,8	[39]
	25,3	192,3	74,3	[39]
Бензиловый спирт	24,6	104,0	79,2	[39]
Бензол	20	307	75,5	[44]
	20	482	49,5	[44]
	24,4	104,0	84,9	[39]
	24,9	148,1	800	[39]
	25,0	192,5	775	[39]
Бензол: бромистый	24,8	104,0	144	[39]
нодистый	25	30	210	[40]
Бензотрихлорид	24,4	104,0	110	[39]
	24,8	192,3	105	[39]
n-Броманизол	24,3	104,0	63,6	[39]
	24,6	192,1	61,1	[39]
o-Броманизол	24,4	104,0	71,3	[39]
	24,6	192,1	68,5	[39]
Бромоформ	25,1	106,9	262	[39]
	25,2	192,2	248	[39]
	25,3	148,1	256	[39]
Бутил: бромистый	2	15	49	[43]
нодистый	2	15	48	[43]
хлористый	2	15	108	[43]
Изобутилацетат	25,0	104,8	60,8	[39]
	25,0	192,1	53,2	[39]
Бутиловый бензол тре-				
тичный	24,6	104,0	70,5	[39]
	24,8	192,3	65,5	[39]
	24,8	192,5	79,3	[39]
Бутиловый спирт	24,8	105,0	81,1	[39]
	25,0	148,0	79,1	[39]
	25,1	192,0	81,4	[39]
Изобутиловый спирт	25,0	107,4	153	[39]
	25,0	148,1	146	[39]
	25,1	192,1	140	[39]
Монобутиловый эфир				
этиленгликоля	24,6	104,1	80,7	[39]
Изовалериановая кислота	25,0	104,8	180	[39]
	25,0	192,5	167	[39]
Вода	20	7—250	25	[46]
	20	307	24,7	[44]
	20	482	23,8	[44]

Продолжение табл. 7.7

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$f, \text{Мгц}$	$\alpha/1^2, 10^{-12} \frac{\text{сек}^2}{\text{см}}$	Литература
Вода	20	843	24,2	[44]
	24,3	192,8	21,2	[39]
Гексан	21	15	77	[43]
	24,9	191,5	56,7	[39]
	25,0	107,5	60,4	[39]
	25,0	148,0	58,5	[39]
Гептан	21	15	80	[43]
Декагидронафталии	24,6	104,0	124	[39]
	24,8	192,6	118	[39]
1,2-Дибромэтан	25	30	311	[41]
Дибутиловый эфир				
o-фталевой кислоты	24,8	192,7	237	[39]
	25,0	148,1	244	[39]
	25,0	107,0	250	[39]
Диметиловый эфир				
o-фталевой кислоты	24,8	192,5	188	[39]
	24,9	148,1	185	[39]
	25,0	107,4	188	[39]
транс-1,2-Диметилцик-				
логексан	23,9	104,1	78,2	[39]
цис-1,3-Диметилцикло-				
гексан	24,6	104,0	102	[39]
транс-1,3-Диметилцик-				
логексан	24,6	104,1	84,6	[39]
цис-1,4-Диметилцик-				
логексан	23,9	104,0	87,6	[39]
транс-1,4-Диметилцик-				
логексан	22,9	104,1	112	[39]
1,1-Диметилциклогексан	24,1	104,1	127	[39]
Диоксан	24,6	104,1	117	[39]
	24,8	192,7	112	[39]
o-Дихлорбензол	24,4	104,1	132	[39]
	25	30	121	[40]
	25,0	192,3	131	[39]
	25,1	148,1	129	[39]
m-Дихлорбензол	25	30	123	[40]
n-Дихлорбензол	60	30	300	[40]
Дихлоруксусная кислота	24,8	192,0	201	[39]
	25,0	104,8	214	[39]
1,1-Дихлорэтан	30,8	30	103	[41]
1,2-Дихлорэтан	28,5	30	136	[41]
транс-Дихлорэтилен	19,8	31	356	[41]
цис-Дихлорэтилен	18,8	31	537	[41]
Дициклогексиламин	24,4	104,0	157	[39]
	24,6	192,7	146	[39]
Диэтиламин	24,4	104,1	35,5	[39]
	24,6	192,7	35,3	[39]
Диэтиловый эфир	24,4	104,1	44,5	[39]
Инден	24,6	104,2	133	[39]
	24,7	192,4	132	[39]
Коричный альдегид	24,8	104,2	96,0	[39]
Кротоновый альдегид	24,6	104,2	82,7	[39]
o-Ксилол	24,4	104,1	63,0	[39]
	24,6	192,6	63,0	[39]
m-Ксилол	25	1—15	78	[42]
Мезитилоксид	24,4	104,1	35,7	[39]
Метилаль	24,4	104,1	39,2	[39]
Метилацетат	24,4	104,2	36,4	[39]
	25	1	468	[42]
Метилбутират	24,5	104,1	35,3	[39]
Метилдисульфид	24,9	104,0	58,7	[39]
Метил нодистый	2	15	247	[43]

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$f, \text{Мгц}$	$\alpha/f^2, 10^{-17} \frac{\text{сек}^2}{\text{см}}$	Литература
Метил иодистый	24,4	104,0	309	[39]
	24,8	192,8	306	[39]
	25	1—4	820	[43]
	25,2	148,1	307	[39]
Метилен: бромистый	25	30	567	[41]
иодистый	25	30	250	[41]
хлористый	20	307	349	[44]
	20	482	177	[44]
	20	843	78,2	[44]
	24,8	192,8	550	[45]
	25,0	148,1	670	[39]
	25	30	1114	[41]
	25,2	7,54	1220	[45]
	25,4	107,4	779	[45]
Метиловый спирт	24,1	104,1	30,1	[39]
	24,9	192,4	30,6	[39]
Метиловый эфир три-хлоруксусной кислоты	24,4	104,0	42,7	[39]
Метилсалицилат	24,5	104,0	57,5	[39]
Метилформамид	24,6	104,1	32,6	[39]
Метилформиат	24,1	104,0	49,3	[39]
Метилциклогексан	24,8	148,0	93,8	[39]
	24,8	192,3	92,9	[39]
	25,0	107,0	98,3	[39]
2-Метилциклогексанон	24,6	104,1	106	[39]
	25,0	192,1	100	[47]
Муравьиная кислота	17,5	4,0	2270	[48]
	20,5	9,8	1170	[48]
о-Нитроанизол	24,6	104,0	69,8	[39]
	24,8	192,1	69,0	[39]
Нитробензол	24,4	104,0	74,2	[39]
	24,8	192,3	74,1	[39]
	25,0	148,1	72,2	[39]
	25	1—15	80	[42]
Пропилацетат	24,4	104,1	42,9	[39]
	25,0	192,1	40,4	[39]
Изопропилацетат	24,6	104,1	62,0	[39]
	25,0	192,1	64,0	[39]
	—	0,55—2,0	87	[49]
Изопропилбензол	24,6	192,2	63,3	[39]
	25,1	106,8	65,3	[39]
Пропил: бромистый	2	15	39	[43]
иодистый	2	15	54	[43]
хлористый	2	15	42	[43]
Пропиловый спирт	22—28	15—280	75	[50]
Изопропиловый эфир	24,4	104,1	52,5	[39]
β -Пиколин	24,4	104,1	66,1	[39]
	24,8	192,6	64,0	[39]
Пиридин	0	0,25—1,0	334	[49]
Пропионовая кислота	24,4	104,1	131	[39]
Сероуглерод	20	0,10—0,45	6130	[49]
	20	1—10	6000	[51]
	24,8	104,0	2068	[39]
	25,5	189,2	776	[39]
	25,6	148,1	1210	[39]
3,5,5-Триметил-1-гексанол	25,2	107,4	294	[39]
	25,5	192,2	663	[39]
	25,7	148,1	269	[39]
1,1,1-Трихлорэтан	25,1	106,8	436	[39]
	25,0	148,1	434	[39]
	24,8	192,6	431	[39]

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$f, \text{Мгц}$	$\alpha/f^2, 10^{-17} \frac{\text{сек}^2}{\text{см}}$	Литература
Тиофен	20	307	775	[44]
	20	482	469	[44]
	20	843	160,0	[44]
Толуол	20	307	77,8	[44]
	20	482	78,5	[44]
	20	843	81,0	[44]
	20—25	1—75	80	[48]
	24,6	192,7	85,5	[39]
	25,2	106,8	85,6	[39]
	27	0,15	205	[52]
Уксусный ангидрид	24,6	104,0	57,7	[39]
Уксусная кислота	18	0,5	90 000	[53]
	18	67,5	158	[53]
	24,7	104,0	153	[39]
	24,8	192,0	139	[39]
Формамид	24,4	104,0	39,2	[39]
Фторбензол	25	30	278	[40]
Фурфуриловый спирт	24,4	104,0	90,5	[39]
	25,0	192,0	91,8	[39]
о-Хлоранилин	24,4	104,0	56,2	[39]
	24,8	192,1	53,7	[39]
Хлорбензол	24,4	104,0	147	[39]
	24,6	192,3	146	[39]
	25	1—4	124	[42]
	25	30	148	[40]
о-Хлорбензальдегид	24,4	104,0	106	[39]
Хлороформ	20	307	365	[44]
	20	482	310	[44]
	20	843	246,0	[44]
	24,4	103,5	363	[39]
	25,2	192,2	365	[39]
	20—25	1—10	400	[31]
о-Хлортолуол	24,4	104,0	72,1	[39]
	24,8	192,6	68,6	[39]
о-Хлорфенол	24,4	104,0	97,6	[39]
	25,0	192,2	93,9	[39]
2-Хлорэтанол	24,4	104,1	58,8	[39]
Циклогексан	24,8	192,3	182	[39]
	25,0	107,5	192	[39]
	25,0	148,0	190	[39]
Циклогексанон	24,6	104,0	72,8	[39]
	24,8	192,0	70,7	[39]
Циклогексен	25,0	107,0	103	[39]
	25,0	148,1	102	[39]
	25,5	191,8	101	[39]
Циклогексиламин	24,6	104,0	67,8	[39]
п-Цимол	24,4	104,1	52	[39]
	24,7	192,7	64,0	[39]
Четыреххлористый угле-род	20	307	522	[44]
	20	482	480	[44]
	20	843	460,0	[44]
	20	1—100	500	[31]
	20	0,25—0,95	530	[49]
	24,6	148,1	556	[39]
	25,1	106,9	546	[39]
	25,1	122,8	545	[39]
Эпихлоргидрин	24,4	104,0	68,1	[39]
Этаиоламин	24,8	104,0	166	[39]
	24,8	192,7	159	[39]
Этилацетат	22	69	37	[54]
	25	1	516	[42]

Таблица 7.9

Скорость звука в твердых телах, м/сек

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$f, \text{Мгц}$	$\alpha/2, 10^{-1}, \frac{\text{сек}^2}{\text{см}}$	Литература
Этилбензол	24,4	104,1	56,0	[39]
	24,8	192,3	54,3	[39]
Этилбутират	24,4	104,0	38,6	[39]
Этилформиат	24,1	104,0	49,9	[39]
	23—28	3	138	[55]
	23—28	16	70	[55]
Этил: бромистый	2	15	61	[43]
	24,6	192,7	75,5	[39]
	24,8	148,1	78,4	[39]
	25,0	106,9	78,7	[39]
иодистый	2	15	40	[43]
Этилен бромистый	25,0	192,4	297	[39]
	25,1	106,9	303	[39]
	25,3	148,1	295	[39]
Этиловый спирт	20—25	1—220	54	[50]
Бензин	—	0,15—1,0	958	[49]
Глицерин	—18,8	30	12700	[58]
	20—27	0,15—4	2500	[56]
	21—23	6—21	1700	[57]
	32,8	30	1410	[58]
Льняное масло	20,5	3,1	1470	[58]
Оливковое масло	21—25	1—4	1250	[42]
Касторовое масло	18,6	3,16	10 900	[58]
	21,4	15,7	2100	[57]
	21,5	4,3	4500	[57]
	21,6	3,95	8400	[58]

Таблица 7.8

Коэффициент поглощения звука в растворах электролитов (0,1 моль/л) при 20°C и различных частотах [59]

Вещество	$\alpha, 10^{-3} \text{ дБ/м}$		$\alpha, \text{дБ/м}$		$\alpha, 10^2 \text{ дБ/м}$	
	10^4 гц	10^5 гц	10^4 гц	10^5 гц	10^4 гц	10^5 гц
H ₂ O	0,0217	2,17	0,217	0,217	21,7	
Al ₂ (SO ₄) ₃	≥0,1	10,0	1,0	1,0	57	
BeSO ₄	1,75	4,8	0,29	0,29	28	
CaCrO ₄	—	≥3,1	0,31	0,31	29	
CaSO ₄	1,77	162	2,3	0,39	31	
Ca (CH ₃ COO) ₂	≥0,036	3,6	0,36	0,36	36	
CuSO ₄	0,282	23	0,43	0,39	39	
MgCrO ₄	≥0,72	54,7	0,48	0,29	29	
MgSO ₄	3,92	247	0,9	0,3	29	
Mg ₂ SiO ₄	1,42	90	0,57	0,28	23,8	
MnSO ₄	0,55	51	5,2	0,74	29	
NiSO ₄	31,0	86	0,48	0,39	29	
ZnSO ₄	≥0,05	5	0,5	0,5	36	
H ₂ SO ₄	—	—	0,24	0,24	24	
AlCl ₃	—	—	0,223	0,223	22,3	
K ₂ SO ₄	—	—	0,227	0,227	22,7	
K ₂ CrO ₄	—	—	0,226	0,226	22,6	
La (NO ₃) ₃	—	—	—	0,5	34	
Li ₂ CO ₃	—	—	0,238	0,238	23,8	
Li ₂ SO ₄	—	—	0,229	0,229	22,9	
Na ₂ CO ₃	—	—	0,24	0,24	0,24	
Na ₂ PO ₄	—	≥3,9	0,39	0,35	30,7	
Na ₂ SO ₄	—	—	0,25	0,25	25	
(NH ₄) ₂ SO ₄	—	—	0,227	0,227	22,7	

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	В стержне	Продольная	Поперечная	Литература
Алюминий	20	5080	6260	3080	[4]
	372	4342	—	—	[60]
Бериллий	—250	—	12660	8900	[61]
	27	—	12550	8830	[61]
Висмут	20	1790	2180	1100	[4]
Вольфрам	20	4310	5460	2620	[4]
Железо	20	5170	5850	3230	[4]
Золото	20	2030	3240	1200	[4]
Иридий	20	4790	—	—	[4]
Кадмий	20	2400	2780	1500	[4]
Константан	20	4300	5240	2640	[4]
Кремний	31,5	—	—	3770	[65]
Латунь	20	3490	4430	2123	[4]
Латунь (70% Cu — 30% Zn)	20	3760	—	—	[62]
Магний	—	4900	—	—	[63]
Манганин	20	3830	4660	2350	[4]
Марганец	—	3830	4660	—	[63]
Медь	20	3710	4700	2260	[4]
	385	3659	—	—	[60]
Нейзильбер	20	3580	4760	2160	[4]
Никель	20	4785	5630	2960	[4]
Олово	20	2730	3320	1670	[4]
Платина	20	2800	3960	1670	[4]
Свинец	20	1200	2160	700	[4]
Серебро	—	2640	3600	1590	[4]
Сталь	—	5050	6100	—	[63]
Сурьма	20	3400	—	—	[63]
Тантал	20	3350	—	—	[63]
Цинк	20	3810	4170	2410	[4]
Чугун	—	3850	4500	2400	[64]
Сплав Mg (50,6% Cd)	—	—	3660	1830	[66]
Германий, кристалл [110], $\rho=5,35 \text{ г/см}^3$	—	—	5390	3540	[65]
Висмут, кристалл, L-срез	4,2°K	—	2140	960	[67]
Свинец, кристалл [100]	1,5°K	—	2350	1266	[68]
Олово, кристалл [100]	1,5°K	—	3480	1900	[68]
Кварц, x-срез	—	5440	5720	—	[64]
АДР (NH ₄ H ₂ PO ₄), z-срез под углом 45°	—	3280	4920	—	[63]
Сегнетова соль: y-срез под углом 45°	—	2470	—	—	[63]
x-срез под углом 45°	—	—	5360	—	[63]
Турмалин, z-срез	—	—	7540	—	[63]
CaF ₂ (флюорит), x-срез	—	6740	—	—	[63]
NaCl (каменная соль), x-срез	—	4510	4780	—	[63]
NaBr, x-срез	—	2790	3200	—	[63]
KCl (сильвин), x-срез	—	4140	4380	—	[63]
KBr, x-срез	—	3380	3480	—	[63]
Стекло: кварцевое	—	5370	5570	3515	[4]
кронглас	—	5300	5660	3420	[4]
тяжелый кронглас	—	4710	5260	2960	[4]
легкий флинтглас	—	4550	4800	2950	[4]
тяжелый флинтглас	—	3490	3760	2220	[4]
Плексиглас	—	—	2670	1121	[4]
Полистирол	—	—	2350	1120	[4]

Продолжение табл. 7.9

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	В стержне	Про- дол- ная	Попе- речная	Литера- тура
Каучук	—	—	1479	—	
Эбонит	—	1570	2405	—	[4]
Пробка	—	500	—	—	[4]
Лед	—	3280	3980	1990	[4]
Фарфор	—	4884	5340	3120	[4]
Парафин	—	1460	—	—	[64]
Гранит	—	3950	—	—	[63]
Мрамор	—	3810	—	—	[63]
Сланец	—	4510	—	—	[63]
Слоновая кость	—	2200	—	—	[4]
Дерево (дуб)	—	4050	—	—	[64]

Таблица 7.10

Коэффициент поглощения звука в твердых телах
(продольные волны, частота $f = 2 \div 100 \text{ кгц}$)

Вещество	$\rho, \text{г/см}^3$	$10^2 \frac{d\alpha}{d\delta}$ м	$\frac{\alpha}{f}, \frac{\text{сек}}{\text{см}}$ 10^{-9}	Литера- тура
Алюминий	2,68	—	0,61	[1]
Магний	1,705	—	1,08	[1]
Сталь:				
вольфрамоуглеродистая	8,52	—	0,38	[1]
молибденовая	8,39	—	1,42	[1]
Кварц плавный	2,2	—	1,23	[1]
Стекло:				
пирекс	2,32	—	4,89	[1]
оконное	2,42	—	6,35	[1]
свинцовое	2,48	—	3,21	[1]
зеркальное	—	3,3	—	[69]
Микалекс	3,34	—	2,03	[1]
Дерево (дуб)	—	2,4	—	[69]
Гипс	—	2,3	—	[69]
Штукатурка	—	3,3	—	[69]
Глина	—	1,5	—	[69]

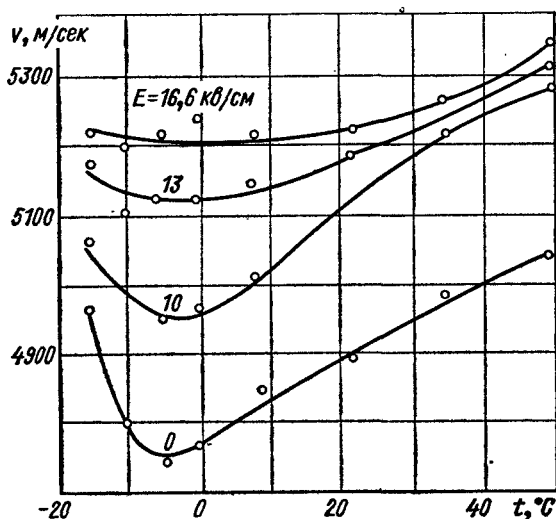


Рис. 7.18. Зависимость скорости звука в титанате бария от температуры в электрических полях с напряженностью E [70].

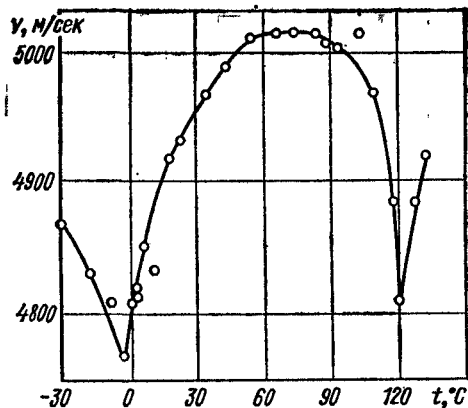


Рис. 7.19. Зависимость скорости звука в титанате бария от температуры [70].

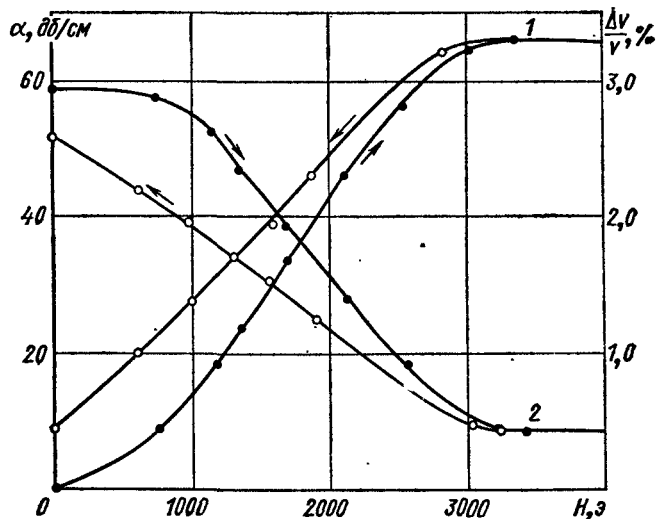


Рис. 7.20. Зависимость изменения скорости (1) и коэффициента поглощения (2) звука ($f = 3 \text{ Мгц}$) в монокристалле никеля от напряженности магнитного поля (знак изменения поля указан стрелками) [71].

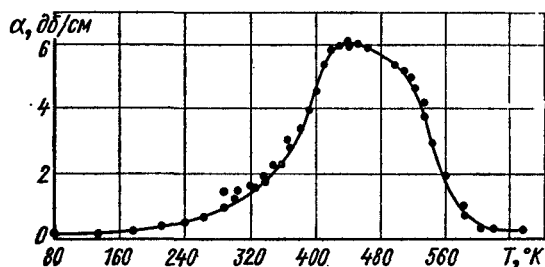


Рис. 7.21. Зависимость коэффициента поглощения звука (продольные волны, $f = 10 \text{ Мгц}$) в монокристалле никеля от температуры [72].

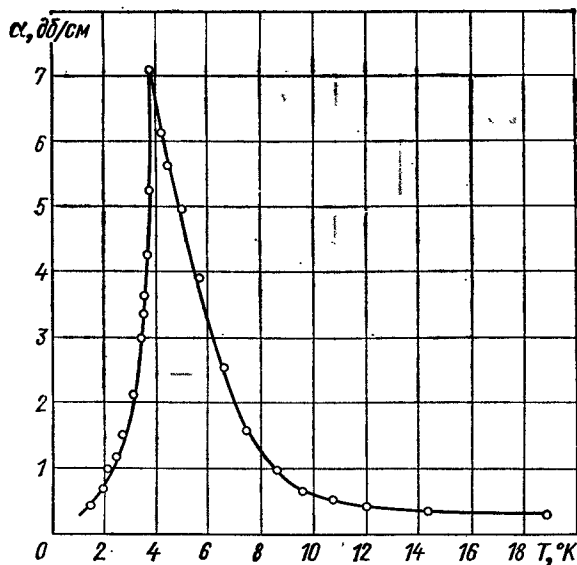


Рис. 7.22. Зависимость коэффициента поглощения звука в чистом олове от температуры ($f = 10,3 \text{ МГц}$) [73].

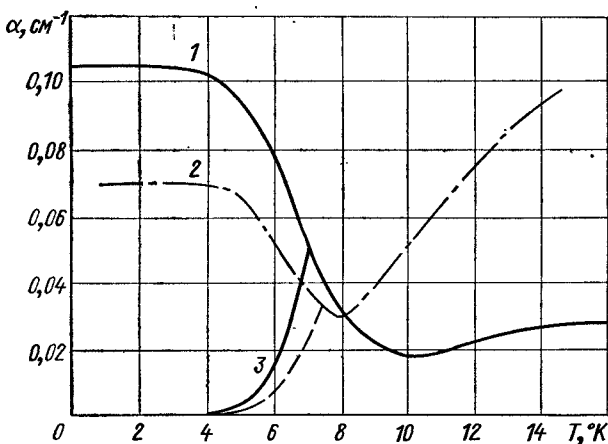


Рис. 7.23. Зависимость коэффициента поглощения звука в свинце от температуры [73]:
1 — продольные волны, $f = 26,3 \text{ МГц}$; 2 — поперечные волны, $f = 10,1 \text{ МГц}$; 3 — сверхпроводящее состояние.

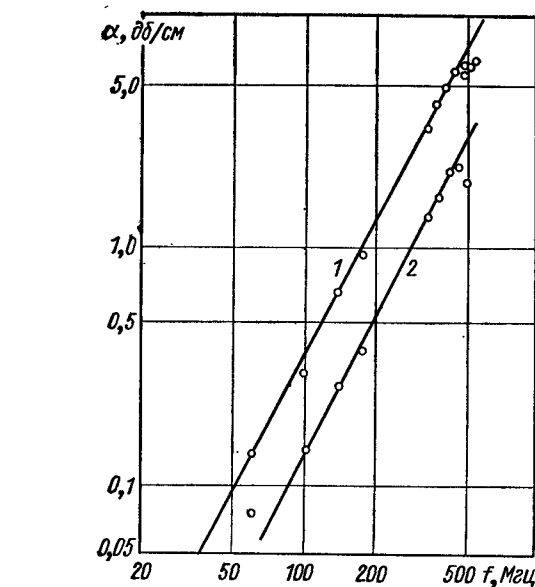
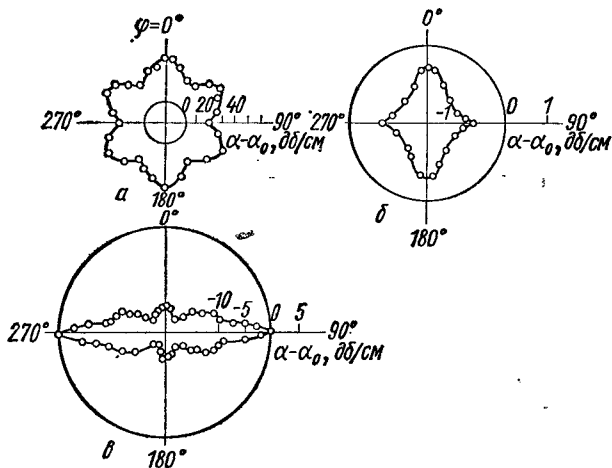


Рис. 7.25. Зависимость коэффициента поглощения звука в германии от частоты для продольной (1) и поперечной (2) волн [75].

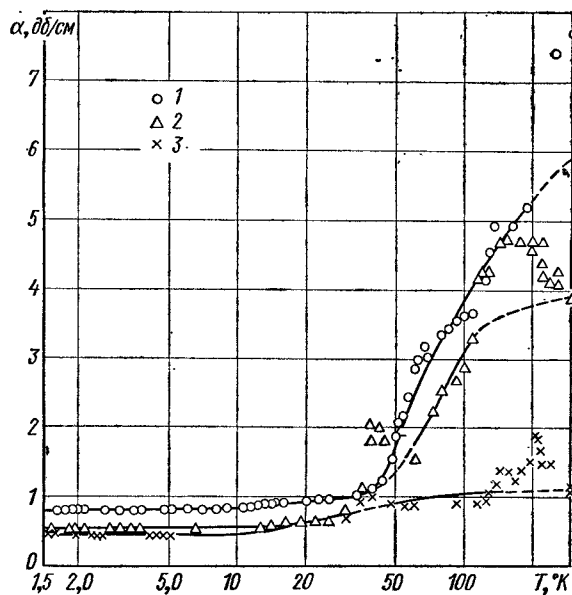


Рис. 7.26. Зависимость коэффициента поглощения звука в германии от температуры [75]:
1 — продольные волны ($f = 508 \text{ МГц}$); 2 — продольные волны ($f = 340 \text{ МГц}$); 3 — поперечные волны ($f = 333 \text{ МГц}$).

Рис. 7.24. Зависимость разности коэффициентов поглощения звука $\alpha_H - \alpha_0$ в монокристалле цинка ($T = 4,2^\circ \text{ К}$), помещенном в магнитное поле ($H = 7000 \text{ э}$), от угла поворота φ вектора $\mathbf{H}$ в плоскости, перпендикулярной к волновому вектору $\mathbf{k}$ звука ($f = 60 \text{ МГц}$) [74]:
а — вектор $\mathbf{k}$ направлен по кристаллографической оси $[0001]$; б — по $[1010]$; в — по $[1120]$ (α_0 — коэффициент поглощения без магнитного поля).

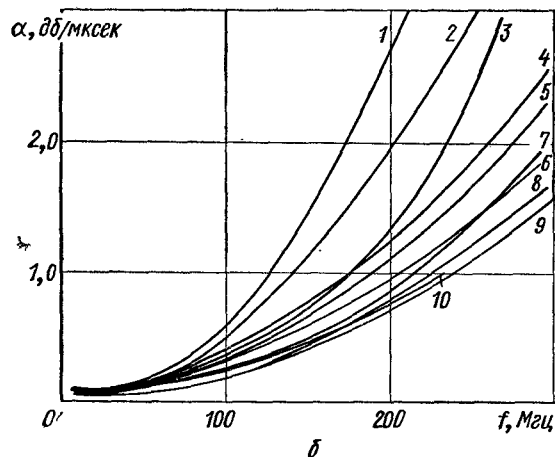
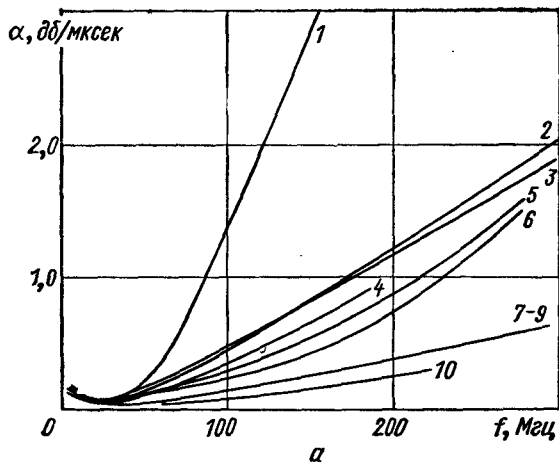


Рис. 7.27. Скорость изменения коэффициента поглощения звука в монокристалле германия от частоты для различных образцов (поперечные (а) и продольные (б) волны в направлении [100]) [76]:

Номер образца	Тип проводимости	Толщина образца, см	Проводимость, (ом·см) ⁻¹
1	n	0,5819	0,55
2	—	1,018	0,2
3	n	0,9073	40
4	n	1,292	46
5	n	0,7615	40
6	—	0,7465	0,25
7	p	0,8212	0,6
8	n	1,238	0,004
9	p	1,270	0,004
10	n	1,012	12,7

Скорость звука в расплавах

Вещество	t, °C	$\frac{v}{\text{м}} \text{ сек}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\frac{\Delta v/\Delta t}{\text{сек} \cdot \text{град}}$	Литература
Висмут	271	1635	271—365	—0,5	[77]
	271	1620	271—1000	—0,209	[79]
	271	1674	271—580	—0,18	[82]
			580—850	—0,22	
	280	1663	289—356	0	[78]
	280	1650	—	—	[80]
	287	1663	—	—	[83]
	300	1661	—	—	[83]
	305	1650	305—442	—0,8	[81]
	29,5	2740	30—50	—	[77]
Галлий	30	2873	30—80	—	[84]
	30	2872	30—275	—0,225	[85]
			275—850	—0,275	
Индий	156	2215	156—260	—0,5	[77]
	156	2315	156—950	—0,27	[86]
Кадмий	321	2220	321—360	—0,51	[77]
	321	2220	321—750	—0,618	[79]
	321	2256	321—700	—0,29	[85]
	335	2215	—	—	[87]
Калий	64	1880	64—160	—0,52	[81]
	100	1869	—	—0,53	[88]
Медь	1083	3270	1083—1400	—0,978	[89]
	1100	3450	1083—1500	—0,46	[82]
Натрий	98	2395	98—235	—0,3	[77]
	100	2526	—	—0,524	[88]
Олово	100	2526	976—972	—0,524	[90]
	100	2652	100—700	—0,577	[91]
	100	2533	100—180	—0,66	[81]
	232	2270	232—380	—0,7	[77]
	232	2420	232—1000	—0,211	[79]
	232	2464	232—335	—0,236	[92]
	232	2473	232—500	—0,247	[93]
	232	2480	232—560	—0,3	[82]
	240	2470	—	—	[80]
	247	2454	230—335	—0,2	[87]
Ртуть	247	2454	—	—	[83]
	300	2455	—	—	[83]
	20	1461	50—150	—0,7	[94]
	20	1452	20—100	—0,312	[95]
	20	1452	20—100	—0,37	[96]
Рубидий	25	1450	25—204	—0,44	[97]
	—	1260	33—160	—0,4	[98]
Свинец	317	1834	—	—0,3	[78]
	327	1790	327—380	—0,5	[77]
	327	1810	327—1000	—0,381	[79]
	328	1776	328—370	—0,277	[92]
Сера	330	1820	327—800	—0,3	[82]
	340	1760	—	—	[80]
	115	1350	—	—	[77]
	961	2770	961—1540	—0,466	[89]
Серебро	970	2710	961—1400	—0,41	[82]
	630	1980	630—880	0	[99]
	630	1904	640—950	Изменяет знак	[82]
Таллий	302	1615	302—310	—	[77]
	305	1660	302—850	—0,231	[85]
Теллур	460	920	460—950	Изменяет знак	[85]
Цезий	—	967	29—130	—0,3	[98]
Цинк	419	2790	—	—	[98]
	419	2840	419—850	—0,268	[99]
	420	2850	419—850	—0,305	[85]
	450	2700	—	—	[80]

Коэффициент поглощения звука в расплавах

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\alpha/f^2, 10^{-17} \frac{\text{сек}^2}{\text{см}}$	Литература	Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\alpha/f^2, 10^{-17} \frac{\text{сек}^2}{\text{см}}$	Литература
Висмут	280 305	271—400 305—442	8,05 9,3	[80] [97]	Натрий	100 100	100—150 104—154	12,1 11,7	[100] [101]
Галлий	30 30 56	30—80 — 56—438	1,58 2,5 2,9	[84] [103] [103]	Олово	240	232—400	5,63	[80]
Кадмий	360	—	14,5	[80]	Ртуть	20 24 25	—13÷72 — 25—204	5,4 5,5 6,2	[103] [102] [97]
Калий	74 75	84—150 75—150	29,9 34,0	[101] [100]	Свинец	25 340	25—130 327—400	6,7 9,4	[100] [80]
					Цинк	419	—	3,7	[80]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Eder F. X. *Moderne Messmethoden der Physik*. Bd 1, Berlin, 1960.
- Petrallia S. *Nuovo cimento, Suppl.*, 1952, v. 9, N. 1, p. 1.
- Blythe A. R. *Acustica*, 1965—1966, v. 15, p. 118.
- Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. Пер. с нем. М., Изд-во иностр. лит., 1956.
- Kneser H. O., *Ergeb. exakt. Naturwiss.*, 1949, Bd 22, S. 121. Nomoto O. *Ultrasonic Waves, Velocity and Absorption of Sound*. Tokyo, 1940; Petrallia S. *Nuovo cimento*, 1951, v. 9, p. 1.
- Hardy H. C., Telfair D., Pielemeier W. H. J. *Acoust. Soc. America*, 1942, v. 13, p. 226; Pielemeier W. H., Hardy H. C. J. *Acoust. Soc. Amer.*, 1941, v. 13, p. 80.
- Краснушкин П. Е., «Докл. АН СССР», 1940, т. 27, с. 214; *Phys. Rev.*, 1944, v. 65, p. 190.
- Байтонис В. В., Яковлев В. Ф. «А куст. журн.», 1966, т. 12, с. 296.
- Lacam A., Noury J. J. *phys. et radium*, 1953, v. 14, p. 272.
- Buckel W., Hilsch R., *Z. Phys.*, 1957, Bd 149, S. 15.
- Van Itterbeek A. J. *Acoust. Soc. Amer.*, 1957, v. 29, p. 584.
- Henderson M. C., Peselnick L. J. *Acoust. Soc. Amer.*, 1957, v. 29, p. 1074.
- Greenspan M. J. *Acoust. Soc. Amer.*, 1956, v. 28, p. 644; Перепечко И. И., Яковлев В. Ф. «Применение ультразвука к исследованию вещества», 1958, т. 6, с. 223.
- Galt J. K. J. *Chem. Phys.*, 1948, v. 16, p. 505.
- Gupill E. W., Hoyt C. K., Robinson D. K. *Canad. J. Phys.*, 1955, v. 33, p. 397.
- Beyer R. T. J. *Chem. Phys.*, 1951, v. 19, p. 788.
- Chase C. E. *Proc. Roy. Soc.*, 1953 (A), v. 220, p. 116; Findlay J. C. e.a. *Phys. Rev.*, 1939, v. 56, p. 122.
- Van Itterbeek A., Forrez G., Teirlinck M. *Physica*, 1957, v. 23, p. 905.
- Pellam J. R., Squire C. F. *Phys. Rev.*, 1947, v. 72, p. 1245; 1947, v. 71, p. 477.
- Пешков В. П. «Докл. АН СССР», 1944, т. 45, с. 385; Лифшиц Е. М., Пешков В. П. «Докл. АН СССР», 1945, т. 4, с. 117.
- Михайлов И. Г. Распространение ультразвуковых волн в жидкостях. М., Гостехиздат, 1949.
- Noury J., Lacam A. J. *phys. et radium*, 1954, v. 15, p. 301.
- Chase C. E. *Proc. Roy. Soc.*, 1953 (A), v. 220, p. 116.
- Van Dael W. e.a. *Physica*, 1965, v. 31, p. 1643.
- Van Itterbeek A. *Nuovo cimento, Suppl.*, 1950, v. 7, N. 2, p. 218.
- Schaaffs W. Z. *Phys.*, 1939, Bd 114, S. 110; *Z. phys. Chem.*, 1944, Bd 194, S. 28; *Z. Naturforsch.*, 1948, Bd 3, S. 396.
- Parthasarathy S. *Proc. Indian Acad. Sci.*, 1935, v. A2, p. 497; 1936, v. A3, p. 285, 482, 519, 544; 1936, v. A4, p. 59, 213; *Current Sci.*, 1937, v. 6, p. 213.
- Richards N. E., Brauner E. J., Bockris J. O. M. *Brit. J. Appl. Phys.*, 1955, v. 6, p. 387.
- Schaaffs W., Nutsch-Kuhnkie R. *Acustica*, 1965—1966, v. 10, p. 66.
- Freyer E. B., Hubbard J. C., Andrens D. W. J. *Chem. Soc. Amer.*, 1929, v. 51, p. 759.
- Willard G. W. J. *Acoust. Soc. Amer.*, 1941, v. 12, p. 438.
- Zeifen N. Z. *Phys.*, 1938, Bd 108, S. 681.
- Barlow A. J., Yazgan E. *Brit. J. Appl. Phys.*, 1966, v. 17, p. 807.
- Smith A. H., Lawson A. W. J. *Chem. Phys.*, 1954, v. 22, p. 35.
- Lagemann R. T., McMillan D. R., Woosley M. J. *Chem. Phys.*, 1948, v. 16, p. 247.
- Цветков В., Маринин В. «Докл. АН СССР», 1949, т. 68, с. 49.
- Baccaredda M., Giacomini A. *Ricerca Scient.*, 1964, v. 16, p. 611; *Atti Acad. Naz. Lincei*, 1946, v. 1, p. 401.
- Weissler A. J. *Chem. Soc. Amer.*, 1948, v. 70, p. 1634.
- Pancholy M., Pande A., Parthasarathy S. J. *Scient. and Indust. Res.*, 1944, v. 3, p. 5; 1944, v. 3, p. 111; 1944, v. 3, p. 159, 263, 354.
- Heasell E. L., Lamb J. *Proc. Phys. Soc.*, 1956, v. 1369, p. 869.
- Sette D. *Colloquium over Ultrasonore Trillingen*, Bruxelles, 1951, Kon. VI.
- Sette D. J. *Chem. Phys.*, 1951, v. 19, p. 1337.
- Pinkerton I. M. M. *Proc. Phys. Soc.*, 1949, v. 62, p. 129; Verma G. S. J. *Chem. Phys.*, 1950, v. 18, p. 1352; Willard G. W. J. *Acoust. Soc. Amer.*, 1941, v. 12, p. 438.
- Pellam J. R., Galt J. K. J. *Chem. Phys.*, 1946, v. 14, p. 608.
- Бердиев А. А., Лежнев Н. Б. «Акуст. журн.», 1966, т. 22, с. 247.
- Andreal J. H. *Proc. Phys. Soc.*, 1957, v. B70, p. 71; 1956, v. 69, p. 869.
- Pinkerton I. M. M. *Nature*, 1948, v. 162, p. 106; Stolz A. *Strahlentherapie*, 1949, Bd 79, S. 641.
- McSkimin H. J. — J. *Acoust. Soc. Amer.*, 1950, v. 22, p. 413.

48. Бажулин П. А. «Ж. эксперим. и теор. физ.», 1938, т. 8, с. 457.
49. Lawley L. E., Reed R. D. *Acustica*, 1955, v. 5, p. 316.
50. Rapuano R. A. *Phys. Rev.*, 1947, v. 72, p. 78.
51. Kishimoto T., Nomoto O. *Bull. Kobayashi Inst. Phys. Res.*, 1952, v. 2, p. 63.
52. Matthias B. T. *Nature*, 1948, v. 161, p. 325.
53. Lamb J., Pinkerton I. M. *M. Proc. Roy. Soc.*, 1949, v. 199, p. 114.
54. Bär R. *Helv. phys. acta*, 1937, v. 10, p. 332.
55. Parthasarathy S. *Current Sci.*, 1938, v. 6, p. 501.
56. Möckel P. *Chem.-Ing. Techn.*, 1952, v. 24, p. 153.
57. Бажулин П. А. «Докл. АН СССР», 1941, т. 31, с. 113.
58. Hunter J. L. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1941, v. 13, p. 36.
59. Tamm K., Kurtze G. *Kaiser. Acustica*, 1954, v. 4, p. 380.
60. Salclani C. *Compt. rend. Acad. Sci.*, 1961, v. 252, p. 3021.
61. Overton W. C. *J. Chem. Phys.*, 1950, v. 18, p. 113.
62. Bell J. F. W. *Philos. Mag.*, 1957, v. 2, p. 1113.
63. Беранек Л. Акустические измерения. Пер. с англ. М., Изд-во иностран. лит., 1952.
64. Красильников В. А. Звуковые и ультразвуковые волны в воздухе, воде и твердых телах. М., Физматгиз, 1960.
65. McSkimin H. J. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1950, v. 22, p. 413.
66. Smith C. S., Wallace W. E. *J. Chem. Phys.*, 1953, v. 21, p. 1120.
67. Walther K. *Phys. Rev. Lett.*, 1966, v. 16, p. 642.
68. Mason W. P., Bommel H. E. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1956, v. 28, p. 930.
69. Техническая энциклопедия. Справочник. Т. 10. М., ОГИЗ, 1933.
70. Федотов И. И., Кузнецов В. Н. «Применение ультразвуки к исследованию вещества», 1961, т. 14, с. 269.
71. De Klerk J. *Proc. Phys. Soc.*, 1959, v. 73, p. 337.
72. West F. G. J. *Appl. Phys.*, 1958, v. 29, p. 480.
73. Mason W. P., Bommel H. E. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1956, v. 28, p. 930.
74. Галкин А. А., Королюк А. П. «Ж. эксперим. и теор. физ.», 1960, т. 38, с. 1688.
75. Dobbs E. R., Chick B. B., Truell R. *Phys. Rev. Lett.*, 1959, v. 3, p. 339.
76. Granato A., Truell R. J. *Appl. Phys.*, 1956, v. 27, p. 1219.
77. Kleppa O. J. *J. Chem. Phys.*, 1950, v. 18, p. 1331.
78. Ходов З. Л. «Физика металлов и металловедение», 1960, т. 10, с. 772.
79. Пронин Л. А., Филиппов С. И. «Изв. вузов. Черная металлургия», 1963, т. 5, с. 10.
80. Plass K. G. *Akust. Beih.*, 1963, Bd 13, S. 240.
81. Илгунас В. И., Яронис Э. П. «Акуст. журн.», 1966, т. 12, с. 145.
82. Гитис М. Б., Михайлов И. Г. «Акуст. журн.», 1965, т. 11, с. 434.
83. Полоцкий И. Г., Ходов З. Л. «Акуст. журн.», 1958, т. 4, с. 184.
84. Hunter J. L., Novak K. S. *J. Chem. Phys.*, 1964, v. 41, p. 4013.
85. Гитис М. Б., Михайлов И. Г. «Акуст. журн.», 1966, т. 12, с. 17.
86. Webler G. M. B. V Congr. Int. D'Acoust, D-37, Liege, 1965.
87. Полоцкий И. Г., Таборов В. Ф., Ходов З. Л. «Акуст. журн.», 1958, т. 5, с. 202.
88. Abowitz G., Gordon R. B. *J. Chem. Phys.*, 1962, v. 37, p. 125.
89. Пронин Л. А., Филиппов С. И. «Изв. вузов. Черная металлургия», 1963, т. 11, с. 11.
90. Pochapsky T. E., Quimby S. L. *Phys. Rev.*, 1950, v. 79, p. 892; 1951, v. 84, p. 553.
91. Трелин Ю. С., Васильев И. В. «Применение ультразвуки к исследованию вещества», 1961, т. 13, с. 3.
92. Gordon R. B. *Acta metallurgica*, 1959, v. 7, p. 1; *Phys. Chem. Proc. Metall*, 1958, v. 1, p. 461.
93. McSkimin H. J. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1959, v. 31, p. 283.
94. Kleppa O. J. *J. Chem. Phys.*, 1949, v. 17, p. 668.
95. Полоцкий И. Г., Ходов З. Л. «Вопр. физики металлов», 1955, т. 6, с. 70.
96. Голик А. З., Классен И. Ф., Кучак Т. М. «Акуст. журн.», 1961, т. 7, с. 258.
97. Jarzynski J. *Proc. Phys. Soc.*, 1963, v. 81, p. 745.
98. Schaafs W. *Acustica*, 1956, v. 6, p. 382.
99. Казаков Н. Б., Пронин Л. А., Филиппов С. И. «Изв. вузов. Черная металлургия», 1964, т. 12, с. 11.
100. Letcher S. V., Beyer R. T. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1963, v. 35, p. 1571.
101. Jarzynski J., Litovitz T. A. *J. Chem. Phys.*, 1964, v. 41, p. 1290.
102. Ringo C. R., Fitzgerald J. W., Hurdle B. G. *Phys. Rev.*, 1947, v. 72, p. 87.
103. Stephens R. W. B. *Est. Rend. Scholle Int. Fisica*, 1963, v. 27, p. 393.

ГЛАВА 8

ТЕРМОМЕТРИЯ

8.1. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ

Измерение температуры предполагает построение шкалы температур на основе воспроизведения ряда характерных явлений — реперных или основных точек, присвоения этим точкам численных значений и создания интерполяционных приборов, реализующих шкалу между ними.

XI Генеральная конференция по мерам и весам (1960 г.) приняла (см. приложение в работе [1]) в качестве основной «Международную термодинамическую температурную шкалу (Кельвина)» с обозначением температуры T и единицы измерения $^{\circ}\text{K}$ (градус Кельвина). Эта шкала базируется на законах термодинамики идеального газа и использует в качестве основной температуру тройной точки воды, которой присвоено значение $273,16^{\circ}\text{K}$. Термин «основная шкала» означает,

согласно положению XI Генеральной конференции что должна «существовать возможность в конечном счете отнести к этой шкале результат любого измерения температуры».

Помимо шкалы Кельвина в ряде случаев применяют производные от нее шкалы с единым обозначением температуры t : 1) шкала Цельсия (единица измерения $^{\circ}\text{C}$): $t = T - 273,15$; 2) шкала Реомюра ($^{\circ}\text{R}$): $t = 0,8T - 218,52$; 3) шкала Фаренгейта ($^{\circ}\text{F}$): $t = 1,8T - 459,67$.

Экспериментальные трудности реализации международной термодинамической шкалы привели к созданию ряда практических шкал, реперные точки которых приводятся в табл. 8.1. В области низких температур иногда используют в качестве дополнительных точки перехода в сверхпроводящее состояние. Некоторые из них даны в табл. 8.2.

Значения некоторых температурных реперных точек [2—5]
Все точки, кроме тройных, при давлении $P = 101325 \text{ н/м}^2$.

Номер точки	Вещество		Точка	Температура		Номер точки	Вещество		Точка	Температура	
	Формула	Название		°К	°С		Формула	Название		°К	°С
1	^4He	Гелий-4	λ -точка	2,18	-270,97	24	H_2O	Вода	Тройная	273,16	0,0100
2	^4He	»	Кипения	4,21	-268,94						
3	$n\text{—H}_2$	Параводород	Тройная	13,81	-259,34	25	$\text{C}_{12}\text{H}_{10}\text{O}$	Эфир дифениловый	»	300,03	26,88
4	$n\text{—H}_2$	Водород (нормальный)	»	13,97	-259,18	26	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 10\text{H}_2\text{O}$	Натрий сернокислый десятиводный	Фазового перехода	305,43	32,38
5	$n\text{—H}_2$	Параводород	Кипения	20,27	-252,88	27	H_2O	Вода	Кипения	373,15	100,0
6	$n\text{—H}_2$	Водород (нормальный)	»	20,39	-252,76	28	$\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_2$	Бензойная кислота	Тройная	395,51	122,36
7	Ne	Неон	Тройная	24,56	-248,59	29	In	Индий	Затвердевания	429,76	156,61
8	Ne	»	Кипения	27,07	-246,08	30	C_{10}H_8	Нафталин	Кипения	491,15	218,0
9	N_2	Азот	Фазового перехода	35,5	-237,65	31	Sn	Олово	Затвердевания	505,05	231,9
10	O_2	Кислород	То же	43,7	-229,45	32	$\text{C}_{14}\text{H}_{10}\text{O}$	Бензофенон	Кипения	579,05	305,9
11	O_2	Кислород	Тройная	54,36	-218,79	33	Cd	Кадмий	Затвердевания	594,18	321,03
12	N_2	Азот	»	63,14	-210,01	34	Pb	Свинец	»	600,53	327,3
13	N_2	»	Кипения	77,35	-195,80	35	Hg	Ртуть	Кипения	629,73	356,58
14	O_2	Кислород	»	90,18	-182,97	36	Zn	Цинк	Затвердевания	692,65	419,505
15	C_5H_{12}	Изопентан	Затвердевания	113,5	-159,65	37	S	Сера	Кипения	717,75	444,60
16	C_7H_{14}	Метилциклогексан	»	146,85	-126,30	38	Sb	Сурьма	Затвердевания	903,65	630,5
17	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	Эфир диэтиловый	»	156,85	-116,30	39	Al	Алюминий	»	934	660,1
18	CS_2	Сероуглерод	»	161,55	-111,60	40	Ag	Серебро	»	1234	960,8
19	C_7H_8	Толуол	»	178,05	-95,10	41	Au	Золото	Затвердевания	1336	1063
20	CO_2	Углекислый газ	Возгонки	194,65	-78,50	42	Cu	Медь	»	1356	1083
21	CHCl_3	Хлороформ	Затвердевания	209,65	-63,50	43	Ni	Никель	»	1726	1453
22	Hg	Ртуть	Затвердевания	234,28	-38,87	44	Co	Кобальт	»	1765	1492
23	H_2O	Вода	»	273,15	0,00	45	Pd	Палладий	»	1825	1552
						46	Pt	Платина	»	2042	1769
						47	Rh	Родий	»	2233	1960
						48	Ir	Иридий	»	2716	2443
						49	W	Вольфрам	»	3653	3380

Таблица 8.2

Температура перехода некоторых веществ в сверхпроводящее состояние [3]

Формула	Название	Температура перехода, °К	Напряженность критического магнитного поля, э	Формула	Название	Температура перехода, °К	Напряженность критического магнитного поля, э
Hf	Гафний	0,37	—	Tl	Таллий	2,392	171
Ti	Титан	0,39	100	In	Индий	3,37—3,42	270
Ru	Рутений	0,47	46	Sn	Олово	3,74	304
Zr	Цирконий	0,55	46,6	Hg	Ртуть	4,160	410
Cd	Кадмий	0,56—0,65	27	Ta	Тантал	4,38	360
Os	Осмий	0,71	65	V	Ванадий	4,89	1340
Rh	Родий	0,9	—	MoC	Карбид молибдена	5,76	—
Zn	Цинк	0,93	50	NbC	Карбид ниобия	6	—
Ga	Галлий	1,103	48	Pb	Свинец	7,22	800
U	Уран	1,1	—	Nb	Ниобий	8,7—8,9	1960
Al	Алюминий	1,175	106	MoGa ₂	—	9,5	—
Re	Рений	1,70	188				

Зависимость некоторых основных точек от давления P выражается следующим образом ($P_0 = 760$ мм рт. ст.) [5]:

1. Точка кипения кислорода ($660 \leq P \leq 860$ мм рт. ст.)
 $t = -182,970 + 9,530 (P/P_0 - 1) - 3,70 (P/P_0 - 1)^2 +$
 $+ 2,2 (P/P_0 - 1)^3$, °С.

2. Точка затвердевания воды (h — глубина под поверхностью смеси льда с водой, мм):

$$t = 0,0099 (1 - P/P_0) - 0,7 \cdot 10^{-6} \cdot h, \text{ °С.}$$

3. Точка кипения воды ($660 \leq P \leq 860$ мм рт. ст.):

$$t = 100,0 + 28,012 (P/P_0 - 1) - 11,64 (P/P_0 - 1)^2 +$$

$$+ 7,1 (P/P_0 - 1)^3, \text{ °С.}$$

Практические шкалы, в отличие от термодинамической, зависят от свойств термометрического тела, что приводит к появлению таких характеристик шкалы, как воспроизводимость и точность. Кроме того, в некоторых случаях практические шкалы основаны на приближенно выполняющихся закономерностях; возникает понятие инструментальной температуры (магнитной, цветовой и т. п.), отличной от истинных значений шкалы.

Международная практическая температурная шкала (Цельсия) 1948 г. (МПТШ — 48, символ t , °С) принята

IX Генеральной конференцией по мерам и весам [2] и определена для температур выше точки кипения кислорода ($t = -182,97^\circ \text{C}$). Шкала Кельвина (T , °К) определена в МПТШ — 48 соотношением $T = t + 273,15$. МПТШ — 48 принята взамен аналогичной шкалы 1927 г.; различие между ними представлено в табл. 8.3.

МПТШ — 48 реализуется в интервале от $-182,97$ до $+630,5^\circ \text{C}$ платиновым термометром сопротивления (см. табл. 8.7) по реперным точкам 14, 23, 27 и 37 в табл. 8.1; в интервале от $630,5$ до 1063°C термопарой Pt — Pt + 10% Rh (табл. 8.17) по реперным точкам 38; 40 и 41 в табл. 8.1; для температур выше 1063°C спектральным пирометром с реперной точкой 41 в табл. 8.1.

Низкотемпературная практическая шкала принята в СССР для измерения температур от 10 до $90,19^\circ \text{K}$ и реализуется платиновым термометром сопротивления (см. табл. 8.8) [7].

Гелиевая шкала T_{58} рекомендована в 1958 г. Консультативным комитетом по термометрии для измерения температур от $0,5$ до 5°K ; реализуется с помощью ^4He -конденсационного термометра (см. табл. 8.26) [8].

Гелиевая шкала T_{62} рекомендована в 1962 г. Консультативным комитетом по термометрии для измерений от $0,2$ до $3,380^\circ \text{K}$; реализуется конденсационным ^3He -термометром (см. табл. 8.25) [9].

Таблица 8.3

Отклонение $\Delta t = t - t'$ практических шкал МПТШ — 27 (t') и МПТШ — 48 (t) [6]

$t, \text{ °C}$	630,5	650	700	750	800	850	900	950	960,8	1000	1050	1063
$\Delta t, \text{ °C}$	0,00	0,08	0,24	0,35	0,42	0,43	0,40	0,32	0,30	0,20	0,05	0,00

Международная практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ — 68 рекомендована в 1968 г. XIII Генеральной конференцией по мерам и весам для внедрения во всех странах взамен МПТШ — 48 и низкотемпературных шкал (выше $13,8^\circ \text{K}$) [10]. В настоящее время (1975 г.) в СССР продолжает действовать МПТШ — 48, а низкотемпературная практическая шкала расширена (в отличие от МПТШ — 48) на область низких температур, вплоть до тройной точки водорода ($T = 13,8^\circ \text{K}$) [11].

В этой области температур шкала реализуется платиновым термометром сопротивления по пяти реперным точкам с помощью таблицы стандартных значений относительного сопротивления, подобной табл. 8.8. Отклонения МПТШ — 68 от значений табл. 8.8 значительно в пределах от $-0,02$ до $+0,04^\circ \text{K}$. В области МПТШ — 48 отклонения более значительны ($1,5^\circ \text{C}$ при 1000°C) и достигают нескольких градусов, что вызвано новыми, уточненными значениями температур реперных точек. В области температур выше 1063°C МПТШ — 68 реализуется аналогично МПТШ — 48, но установлено новое значение постоянной $C_2 = 0,014388$ в формуле Планка для распределения энергии в спектре излучения черного тела [12].

МПТШ — 68 устанавливает наименование «кельвин» вместо «градус Кельвина» и обозначение К вместо °К.

8.2 ЖИДКОСТНО-СТЕКЛЯННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Жидкостно-стеклянная термометрия основана на законах теплового расширения; область применения ограничена снизу температурой затвердевания, а сверху — температурой кипения термометрической жидкости или температурой размягчения стекла. Жидкостные термометры позволяют измерять температуру в интервале от -200 до $+1200^\circ \text{C}$. В табл. 8.4 и 8.5 приведены сведения о свойствах важнейших термометрических жидкостей и стекол, используемых при изготовлении термометров.

Если термометр не полностью погружен в среду, температура которой измеряется, необходимо показание термометра увеличить на $\Delta t = l\alpha(t_1 - t_2)$, где α — температурный коэффициент объемного расширения термометрической жидкости в стекле (см. табл. 8.4); l — длина выступающего столбика в градусах шкалы; t_1 — показания термометра; t_2 — положение середины выступающего столбика на шкале термометра.

Свойства термометрических жидкостей [13—15]

Жидкость	Рабочая температура, °C		Температурный коэффициент объемного расширения при 18 °C, град ⁻¹	Марка стекла	Жидкость	Рабочая температура, °C		Температурный коэффициент объемного расширения при 18 °C, град ⁻¹	Марка стекла
	от	до				от	до		
Пентан	—130	36	0,00145	Иена 16'''	Амальга таллия	—66	—	0,000179	—
Петролейный эфир	—130	—	0,00115	Иена 16'''	n-Ксилол	—53	139	0,000155	Иена 16'''
Сероуглерод	—113	46	0,00121	—	Ртуть	—35	350	0,00101	—
Спирт этиловый	—100	77	0,00104	Иена 16'''				0,000179	Кварц
Спирт метиловый	—90	60	0,00122	—				0,000181	—
Спирт амиловый	—80	137	0,00093	—				0,000158	ГОСТ 1224—41
Толуол	—90	100	0,00103	Иена 16'''	Галлий	29,8	1200	0,000157	Иена 16'''
Ацетон	—93	56	0,00131	—				0,000159	Иена 59'''
								—	Кварц

Таблица 8.5

Свойства термометрических стекол [16]

Стекло	Температура размягчения, °C	Температурный коэффициент объемного расширения, град ⁻¹
Боросиликатное, типа Иена 16'''	300	0,000156
Боросиликатное, типа Иена 59'''	500	0,000163
Термометрическое, ГОСТ 1224—41	300	0,000180
Кварцевое	900	0,000180

Таблица 8.6

Воспроизводительность МПТШ—48 ртутными термометрами [16]

Стекло	Температура, °C							
	0	50	100	150	200	250	300	500
Иена 16'''	0	0,12	0	—0,01	0,29	1,1	2,7	—
Иена 59'''	0	0,03	0	0,23	0,84	2,2	4,4	26,0

8.3. ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Измерение температуры по электрическому сопротивлению металлического проводника основано на плавной и стабильной зависимости удельного сопротивления от температуры. Нижний предел температур, измеряемых термометрами сопротивления, определяется чувствительностью, которая, вообще говоря, уменьшается с понижением температуры. Верхний предел обусловлен появлением неустойчивости сопротивления по мере приближения к температуре плавления или рекристаллизации проводника. В табл. 8.7—8.10 приведе-

ны градуировочные значения платинового, медного и титанового термометров сопротивления в относительных единицах.

Таблица 8.7

Стандартная градуировочная таблица платинового термометра сопротивления [13, 17]

Приведены значения электрического сопротивления платины ГОСТ 8588—57 в относительных единицах. Погрешность равна $\pm (0,3 + 6 \cdot 10^{-3}t)$ для $t < 0^\circ\text{C}$ и $\pm (0,3 + 4,5 \cdot 10^{-3}t)$ для $t > 0^\circ\text{C}$.

t, °C	0	2	4	6	8
—200	0,1728	—	—	—	—
—190	0,2165	0,2078	0,1991	0,1903	0,1816
—180	0,2598	0,2512	0,2425	0,2339	0,2252
—170	0,3029	0,2943	0,2857	0,2771	0,2685
—160	0,3456	0,3371	0,3285	0,3200	0,3114
—150	0,3880	0,3795	0,3711	0,3626	0,3541
—140	0,4302	0,4218	0,4133	0,4049	0,3965
—130	0,4721	0,4637	0,4553	0,4470	0,4386
—120	0,5138	0,5054	0,4971	0,4888	0,4804
—110	0,5552	0,5469	0,5387	0,5304	0,5221
—100	0,5965	0,5882	0,5800	0,5717	0,5635
—90	0,6375	0,6293	0,6211	0,6129	0,6047
—80	0,6784	0,6702	0,6621	0,6539	0,6457
—70	0,7191	0,7110	0,7028	0,6947	0,6865
—60	0,7596	0,7515	0,7434	0,7355	0,7272
—50	0,8000	0,7920	0,7839	0,7758	0,7677
—40	0,8403	0,8322	0,8242	0,8162	0,8081
—30	0,8804	0,8724	0,8644	0,8563	0,8483
—20	0,9204	0,9124	0,9044	0,8964	0,8884
—10	0,9603	0,9523	0,9443	0,9363	0,9284
—0	1,0000	0,9921	0,9841	0,9762	0,9682
+0	1,0000	1,0079	1,0159	1,0238	1,0317
10	1,0396	1,0475	1,0554	1,0633	1,0712
20	1,0791	1,0870	1,0949	1,1028	1,1107
30	1,1185	1,1264	1,1343	1,1421	1,1500
40	1,1578	1,1657	1,1735	1,1813	1,1891
50	1,1970	1,2048	1,2126	1,2204	1,2282

$t, ^\circ\text{C}$	0	2	4	6	8
60	1,2360	1,2438	1,2516	1,2594	1,2672
70	1,2749	1,2827	1,2905	1,2982	1,3060
80	1,3137	1,3215	1,3292	1,3370	1,3447
90	1,3524	1,3602	1,3679	1,3756	1,3833
100	1,3910	1,3987	1,4064	1,4141	1,4218
110	1,4295	1,4371	1,4448	1,4525	1,4601
120	1,4678	1,4755	1,4831	1,4907	1,4984
130	1,5060	1,5137	1,5213	1,5289	1,5365
140	1,5441	1,5517	1,5593	1,5669	1,5745
150	1,5821	1,5897	1,5973	1,6049	1,6124
160	1,6200	1,6276	1,6351	1,6427	1,6502
170	1,6578	1,6653	1,6728	1,6803	1,6879
180	1,6954	1,7029	1,7104	1,7179	1,7254
190	1,7329	1,7404	1,7479	1,7554	1,7628
200	1,7703	1,7778	1,7852	1,7927	1,8002
210	1,8076	1,8151	1,8225	1,8299	1,8374
220	1,8448	1,8522	1,8596	1,8670	1,8744
230	1,8818	1,8892	1,8966	1,9040	1,9114
240	1,9188	1,9261	1,9335	1,9409	1,9482
250	1,9556	1,9629	1,9703	1,9776	1,9850
260	1,9923	1,9996	2,0069	2,0142	2,0216
270	2,0289	2,0362	2,0435	2,0508	2,0580
280	2,0653	2,0726	2,0799	2,0872	2,0944
290	2,1017	2,1089	2,1162	2,1234	2,1307
300	2,1379	2,1451	2,1524	2,1596	2,1668
310	2,1740	2,1812	2,1885	2,1957	2,2029
320	2,2100	2,2172	2,2244	2,2316	2,2388
330	2,2459	2,2531	2,2602	2,2674	2,2745
340	2,2817	2,2888	2,2960	2,3031	2,3102
350	2,3173	2,3245	2,3316	2,3387	2,3458
360	2,3529	2,3600	2,3671	2,3741	2,3812
370	2,3883	2,3954	2,4024	2,4095	2,4165
380	2,4236	2,4306	2,4377	2,4447	2,4517
390	2,4588	2,4658	2,4728	2,4798	2,4868
400	2,4938	2,5008	2,5078	2,5148	2,5218
410	2,5288	2,5358	2,5427	2,5497	2,5567
420	2,5636	2,5706	2,5775	2,5845	2,5914
430	2,5983	2,6053	2,6122	2,6191	2,6260
440	2,6329	2,6398	2,6467	2,6536	2,6605
450	2,6674	2,6743	2,6812	2,6880	2,6949
460	2,7018	2,7086	2,7155	2,7223	2,7292
470	2,7360	2,7429	2,7497	2,7565	2,7633
480	2,7701	2,7770	2,7838	2,7906	2,7974
490	2,8041	2,8108	2,8176	2,8244	2,8312
500	2,8380	2,8448	2,8516	2,8583	2,8651
510	2,8718	2,8786	2,8853	2,8920	2,8988
520	2,9055	2,9122	2,9189	2,9256	2,9323
530	2,9391	2,9457	2,9525	2,9591	2,9658
540	2,9725	2,9792	2,9858	2,9925	2,9991
550	3,0058	3,0124	3,0191	3,0257	3,0323
560	3,0390	3,0456	3,0512	3,0588	3,0655
570	3,0721	3,0787	3,0853	3,0918	3,0984
580	3,1050	3,1116	3,1182	3,1247	3,1313
590	3,1374	3,1444	3,1510	3,1575	3,1641
600	3,1706	3,1771	3,1837	3,1901	3,1967
610	3,2032	3,2097	3,2162	3,2227	3,2292
620	3,2357	3,2422	3,2487	3,2551	3,2616
630	3,2680	3,2745	3,2810	3,2874	3,2939
640	3,3003	3,3068	3,3132	3,3196	3,3260
650	3,3325	—	—	—	—

Стандартная градуировочная таблица платинового термометра сопротивления при низких температурах [1, 13, 18]

Приведены значения электрического сопротивления платины ГОСТ 8588—57 в относительных единицах; R_0 — сопротивление при 0°C .

$\frac{R(T)}{R_0}$	$T, ^\circ\text{K}$	$\frac{R(T)}{R_0}$	$T, ^\circ\text{K}$	$\frac{R(T)}{R_0}$	$T, ^\circ\text{K}$
0,0008	10,2175	0,0054	21,4067	0,032	36,5242
0,0009	11,0876	0,0056	21,6323	0,034	37,2723
0,0010	11,8013	0,0058	21,8520	0,036	38,0003
0,0011	12,4085	0,0060	22,0662	0,038	38,7015
0,0012	12,9382	0,0062	22,2751	0,040	39,4033
0,0013	13,4091	0,0064	22,4791	0,042	40,0812
0,0014	13,8338	0,0066	22,6784	0,044	40,7453
0,0015	14,2208	0,0068	22,8733	0,046	41,3968
0,0016	14,5774	0,0070	23,0641	0,048	42,0370
0,0017	14,9089	0,0072	23,2510	0,050	42,6663
0,0018	15,2193	0,0074	23,4343	0,052	43,2859
0,0019	15,5118	0,0076	23,6143	0,054	43,8962
0,0020	15,7887	0,0078	23,7911	0,056	44,4987
0,0021	16,0519	0,0080	23,9647	0,058	45,0927
0,0022	16,3032	0,0082	24,1354	0,060	45,6791
0,0023	16,5434	0,0084	24,3033	0,062	46,2586
0,0024	16,7737	0,0086	24,4684	0,064	46,8316
0,0025	16,9950	0,0088	24,6307	0,066	47,3985
0,0026	17,2083	0,0090	24,7905	0,068	47,9597
0,0027	17,4141	0,0092	24,9479	0,070	48,5156
0,0028	17,6131	0,0094	25,1032	0,072	49,0664
0,0029	17,8061	0,0096	25,2563	0,074	49,6124
0,0030	17,9985	0,0098	25,4074	0,076	50,1539
0,0031	18,1754	0,0100	25,5565	0,078	50,6913
0,0032	18,3521	0,0110	26,2737	0,080	51,2247
0,0033	18,5239	0,0120	26,9503	0,082	51,7544
0,0034	18,6912	0,0130	27,5924	0,084	52,2805
0,0035	18,8544	0,0140	28,2046	0,086	52,8013
0,0036	19,0199	0,0150	28,7911	0,088	53,3225
0,0037	19,1698	0,0160	29,3537	0,090	53,8387
0,0038	19,3221	0,0170	29,8963	0,092	54,3520
0,0039	19,4711	0,0180	30,4213	0,094	54,8626
0,0040	19,6270	0,0190	30,9294	0,096	55,3708
0,0041	19,7601	0,0200	31,4224	0,098	55,8766
0,0042	19,9004	0,0210	31,9014	0,100	56,3807
0,0043	20,0328	0,0220	32,3679	0,110	58,8687
0,0044	20,1736	0,0230	32,8234	0,120	61,3143
0,0045	20,3006	0,0240	33,2685	0,130	63,7247
0,0046	20,4372	0,0250	33,7035	0,140	66,1073
0,0047	20,5654	0,0260	34,1288	0,150	68,4697
0,0048	20,6912	0,0270	34,5471	0,160	71,2485
0,0049	20,8149	0,0280	34,9555	0,170	73,1417
0,0050	20,9366	0,0290	35,3577	0,174	74,0709
0,0052	21,1751	0,0300	35,7528	0,182	75,9256

Стандартная градуировочная таблица медного термометра сопротивления [13, 17]

Приведены значения электрического сопротивления в относительных единицах. Погрешность $\pm (0,3 \pm 6 \cdot 10^{-3} t)$

$t, ^\circ\text{C}$	0	2	4	6	8	$t, ^\circ\text{C}$	0	2	4	6	8
—50	0,7870	—	—	—	—	70	1,2982	1,3067	1,3152	1,3238	1,3323
—40	0,8296	0,8211	0,8126	0,8040	0,7955	80	1,3408	1,3493	1,3578	1,3664	1,3749
—30	0,8722	0,8637	0,8552	0,8466	0,8381	90	1,3834	1,3919	1,4004	1,4090	1,4175
—20	0,9148	0,9063	0,8978	0,8892	0,8807	100	1,4260	1,4345	1,4430	1,4516	1,4601
—10	0,9574	0,9489	0,9404	0,9318	0,9233	110	1,4686	1,4771	1,4856	1,4942	1,5027
—0	1,0000	0,9915	0,9830	0,9744	0,9659	120	1,5112	1,5197	1,5282	1,5368	1,5453
+0	1,0000	1,0085	1,0170	1,0256	1,0341	130	1,5538	1,5623	1,5708	1,5794	1,5879
10	1,0426	1,0511	1,0596	1,0682	1,0767	140	1,5964	1,6049	1,6134	1,6220	1,6305
20	1,0852	1,0937	1,1022	1,1108	1,1193	150	1,6390	1,6475	1,6560	1,6646	1,6731
30	1,1278	1,1363	1,1448	1,1534	1,1619	160	1,6816	1,6901	1,6986	1,7072	1,7157
40	1,1704	1,1789	1,1874	1,1960	1,2045	170	1,7242	1,7327	1,7412	1,7498	1,7583
50	1,2130	1,2215	1,2300	1,2386	1,2471	180	1,7668	—	—	—	—
60	1,2556	1,2641	1,2726	1,2812	1,2897						

Таблица 8.10

Градуировочная таблица титанового термометра сопротивления [1]

Приведены значения относительного сопротивления.

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40
—200	0,15763	—	—	—	—
—100	0,55284	0,50900	0,46516	0,42194	0,37907
—0	1,00000	0,95433	0,90899	0,86398	0,81917
+0	1,00000	1,04601	1,09234	1,13899	1,18583
100	1,46094	—	—	—	—
$t, ^\circ\text{C}$	50	60	70	80	90
—100	0,33751	0,29721	0,25833	0,22150	0,18783
—0	0,77456	0,73003	0,68566	0,64135	0,59707
+0	1,23286	1,27973	1,32643	1,37235	0,41741

8.4. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ

Термоэлектрическая термометрия основана на измерении термо-э. д. с. E , возникающей под действием температуры в термопаре — проводнике, состоящем из двух разнородных электродов. Термо-э.д.с. термопары определяется объемной термо-э.д.с., вызванной термодиффузией носителей тока; контактной термо-э.д.с., возникающей в стыке электродов в результате различия температурных зависимостей контактной разности потенциалов, и термо-э.д.с., вызванной эффектом увлечения электронов фононами. В зависимости от температуры и материала термопары любая из этих составляющих может дать наибольший вклад, поэтому

зависимость E от температуры, вообще говоря, является немонотонной.

На практике обычно используют участки монотонной зависимости, поэтому один из пределов пригодности определяется чувствительностью термопары dE/dT . Как правило, другой предел обусловлен появлением неустойчивости в температурной зависимости термо-э.д.с. либо под действием температур, близких к температуре плавления, рекристаллизации или интенсивного химического взаимодействия со средой, либо в результате недостаточной для измерения данной температуры очистки материалов термопары. Эксплуатационные характеристики термопар, градуировочные таблицы которых приведены в настоящей главе, даны в табл. 8.11.

Эксплуатационные характеристики термопар [14. 19—21]

Термопара	Рабочий интервал, °К	Максимальная термо-э.д.с., мВ	Погрешность измерений, град	Рабочая среда
Медь — константан	2—700	21	$\pm (0,1-1)$	Окислительная или воздух
Cu — Au + 2,11 ат. % Co	2—300	10	$\pm (0,03-0,7)$	Воздух
Cu — Ag + 0,37 ат. % Au	25—300	0,2	$\pm 0,05$	"
Железо — константан	70—1300	58	± 1	Окислительная
Хромель — алюмель	220—1600	52	$\pm (5-10)$	Окислительная или нейтральная
Хромель — копель	220—1100	66	$\pm (3-5)$	То же
Pt — Pt+10% Rh	250—2100	17	$\pm (1-3,5)$	Воздух
Никель — инхром	250—1500	49	± 1	Окислительная
W + 5% Re — W + 20% Re	400—2800	30	$\pm (0,1-4)$	Вакуум или нейтральная
НК — СА	570—1300	13	± 2	Воздух
Pt — Pt+30% Rh	570—2100	14	$\pm (3,3-6)$	"
Вольфрам — молибден	1300—2800	8	± 5	Вакуум или нейтральная

Ниже приведены градуировочные таблицы различных термопар. При использовании этих таблиц следует учесть, что большинство из них (исключая стандартные) отличаются от реальных ввиду некоторого непостоянства состава электродов; приведены средние значения,

и их отклонения от реальных должны быть получены экспериментальной привязкой в нескольких реперных точках (см. табл. 8.1). Градуировочные таблицы стандартных термопар соответствуют реальным в пределах указываемой рабочей погрешности.

Таблица 8.12

Градуировочные значения термо-э.д.с. низкотемпературных термопар, мВ, при температуре свободных концов 0°C [3]

T, °К	Cu — константан	Cu — Au + 2,11 ат. % Co	Cu — Ag + 0,37 ат. % Au	T, °К	Cu — константан	Cu — Au + 2,11 ат. % Co	Cu — Ag + 0,37 ат. % Au
2	0,70	2,04	—	110	1351,9	2930,5	64,2
4	2,76	8,04	—	120	1566,5	3312,6	71,1
6	6,14	17,76	—	130	1793,1	3700,6	77,9
8	10,79	37,01	—	140	2031,8	4093,2	84,3
10	16,64	47,57	—	150	2282,4	4489,6	90,7
12	23,66	67,23	—	160	2545,0	4888,7	96,9
14	31,78	89,78	—	170	2819,8	5290,1	103,1
16	40,97	115,0	—	180	3106,7	5693,3	109,1
18	51,22	142,9	—	190	3405,2	6098,1	115,9
20	62,48	173,1	—	200	3714,1	6504,0	123,4
25	95,18	259,5	0,65	210	4033,2	6910,6	128,9
30	134,1	360,1	2,05	220	4362,7	7317,6	135,3
35	178,6	472,6	4,25	230	4702,2	7724,8	142,2
40	228,5	595,8	7,40	240	5051,9	8131,9	148,8
45	283,3	728,3	11,15	250	5411,7	8538,8	155,5
50	342,8	869,0	15,25	260	5781,5	8945,3	162,3
60	474,7	1171,1	24,10	270	6161,5	9351,1	169,7
70	622,4	1495,4	33,20	280	6551,7	9756,3	177,1
80	784,4	1836,3	41,70	290	6952,1	10160	184,8
90	960,5	2190,3	49,5	300	7362,9	10564	192,9
100	1149,8	2555,8	51,7				

Градуировочная таблица термо-э.д.с. термопары железо — константан, мВ [22]

Температура свободных концов 0°C; состав константана: 60% Cu—40%Ni.

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
—200	—8,27	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—100	—4,82	—5,25	—5,66	—6,06	—6,44	—6,80	—7,14	—7,46	—7,75	—8,02
—0	0,00	—0,52	—1,03	—1,53	—2,03	—2,52	—3,00	—3,47	—3,93	—4,38
+0	0,00	0,52	1,05	1,58	2,12	2,66	3,20	3,75	4,30	4,85
100	5,40	5,95	6,51	7,07	7,63	8,19	8,75	9,31	9,87	10,43
200	10,99	11,56	12,12	12,68	13,23	13,79	14,36	14,91	15,47	16,02
300	16,57	17,13	17,68	18,23	18,78	19,33	19,88	20,43	20,98	21,53
400	22,08	22,63	23,18	23,73	24,28	24,83	25,38	25,93	26,48	27,04
500	27,59	28,15	28,71	29,27	29,83	30,40	30,97	31,54	32,12	32,70
600	32,28	33,87	34,46	35,05	35,65	36,25	36,85	37,45	38,06	38,68
700	39,30	39,93	40,56	41,19	41,83	42,47	43,11	43,76	44,41	45,06
800	45,71	46,36	47,02	47,68	48,33	48,99	49,65	50,31	50,96	51,62
900	52,28	52,87	53,47	54,06	54,65	55,25	55,84	56,43	57,03	57,64
1000	58,33	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 8.14

Стандартная градуировочная таблица термо-э.д.с. термопары хромель — алюминь, мВ [13, 19]

Допустимая погрешность $\pm 0,16$ мВ при $t < 300^\circ\text{C}$ и $\pm [0,16 + 2 \cdot 10^{-4} (t - 300)]$ мВ при $t > 300^\circ\text{C}$. Электроды: хромель НХ 9,5, алюминь НМц АК 2-2-1. Температура свободных концов 0°C.

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
—0	—0,00	—0,39	—0,77	—1,14	—1,50	—1,86	—	—	—	—
+0	0,00	0,40	0,80	1,20	1,61	2,02	6,43	2,85	3,26	3,68
100	4,10	4,51	4,92	5,33	5,73	6,13	2,53	6,93	7,33	7,73
200	8,13	8,53	8,93	9,34	9,74	10,15	10,56	10,97	11,38	11,80
300	12,21	12,62	13,04	13,45	13,87	14,29	14,71	15,13	15,55	15,97
400	16,39	16,82	17,24	17,66	18,08	18,50	18,93	19,36	19,78	20,21
500	20,64	21,07	21,49	21,92	22,34	22,77	23,20	23,62	24,05	24,48
600	24,90	25,33	25,75	26,18	26,60	27,03	27,45	27,87	28,29	28,72
700	29,14	29,56	29,99	30,40	30,82	31,23	31,65	32,07	32,48	32,90
800	33,31	33,71	34,12	34,54	34,94	35,35	35,75	36,16	36,56	36,96
900	37,36	37,76	38,16	38,56	38,96	39,35	39,75	40,14	40,53	40,92
1000	41,31	41,70	42,08	42,47	42,86	43,24	43,62	44,00	44,38	44,76
1100	45,14	45,52	45,89	46,27	46,64	47,01	47,38	47,75	48,12	48,43
1200	48,85	49,21	49,57	49,95	50,29	50,65	51,00	51,36	51,71	52,06
1300	52,41	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 8.15

Стандартная градуировочная таблица термо-э.д.с. термопары хромель — конпель, мВ [13, 19]

Допустимая погрешность $\pm 0,2$ мВ при $t < 300^\circ\text{C}$ и $\pm [0,2 + 0,6 \cdot 10^{-4} (t - 300)]$ мВ при $t > 300^\circ\text{C}$. Электроды: хромель НХ 9,5, конпель МНМц 43-0,5. Температура свободных концов 0°C.

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
—0	0,00	—0,64	—1,27	—1,89	—2,50	—3,11	—	—	—	—
+0	0,00	0,65	1,31	1,98	2,66	3,35	4,05	4,76	5,48	6,21
100	6,95	7,69	8,43	9,18	9,93	10,69	11,46	12,24	13,03	13,84
200	14,65	15,47	16,30	17,12	17,95	18,77	19,60	20,43	21,25	22,08
300	22,91	23,75	24,60	25,45	26,31	27,16	28,02	28,89	29,76	30,62
400	31,49	32,35	33,22	34,08	34,95	35,82	36,68	37,55	38,42	39,29
500	40,16	41,03	41,91	42,79	43,68	44,56	45,45	46,34	47,23	48,12
600	49,02	49,90	50,78	51,66	52,53	53,41	54,28	55,15	56,03	56,90
700	57,77	58,64	59,51	60,37	61,24	62,11	62,97	63,83	64,70	65,56
800	66,42	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Градуировочная таблица термо-э.д.с. термопары медь — константан*, мВ [22]

Константан — сплав 60% Cu—40% Ni. Температура свободных концов 0°C.

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0,000	0,389	0,787	1,194	1,610	2,035	2,467	2,908	3,357	3,813
100	4,277	4,749	5,227	5,712	6,204	6,703	7,208	7,719	8,236	8,759
200	9,288	9,823	10,363	10,909	11,459	12,015	12,575	13,140	13,710	14,285
300	14,864	15,447	16,035	16,626	17,222	17,821	18,425	19,032	19,642	20,255
400	20,874	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Низкотемпературную часть градуировки см. в табл. 8.12.

Таблица 8.17

Продолжение табл. 8.17

Стандартная градуировочная таблица термо-э. д. с. термопары Pt—Pt + 10% Rh, мВ [19]

Допустимая погрешность $\pm 0,01$ мВ при $t < 300^\circ\text{C}$
 и $\pm [0,01 + 2,5 \cdot 10^{-5}(t - 300)]$ мВ при $t > 300^\circ\text{C}$.
 Температура свободных концов 0°C .

$t, ^\circ\text{C}$	0	2	4	6	8
-20	-0,109	—	—	—	—
-10	-0,055	-0,066	-0,077	-0,087	-0,098
0	0,000	-0,011	-0,022	-0,033	-0,044
+0	0,000	0,011	0,022	0,034	0,045
10	0,057	0,069	0,080	0,092	0,103
20	0,115	0,127	0,139	0,151	0,164
30	0,176	0,188	0,200	0,212	0,225
40	0,237	0,250	0,263	0,275	0,288
50	0,301	0,314	0,327	0,340	0,353
60	0,366	0,379	0,392	0,406	0,419
70	0,432	0,446	0,459	0,473	0,486
80	0,500	0,514	0,527	0,541	0,555
90	0,569	0,583	0,597	0,611	0,626
100	0,640	0,654	0,669	0,683	0,698
110	0,712	0,727	0,742	0,756	0,771
120	0,786	0,801	0,816	0,831	0,846
130	0,861	0,876	0,891	0,907	0,922
140	0,937	0,952	0,968	0,983	0,999
150	1,014	1,030	1,046	1,061	1,077
160	1,093	1,109	1,125	1,141	1,157
170	1,173	1,189	1,205	1,222	1,238
180	1,254	1,271	1,287	1,304	1,320
190	1,337	1,354	1,370	1,387	1,404
200	1,421	1,438	1,455	1,472	1,490
210	1,507	1,525	1,542	1,560	1,577
220	1,595	1,613	1,630	1,648	1,665
230	1,683	1,701	1,718	1,736	1,754
240	1,771	1,789	1,807	1,824	1,842
250	1,860	1,878	1,896	1,913	1,931
260	1,949	1,967	1,985	2,003	2,021
270	2,039	2,057	2,075	2,093	2,111
280	2,129	2,147	2,165	2,183	2,201
290	2,219	2,237	2,255	2,274	2,292
300	2,310	2,328	2,346	2,365	2,383
310	2,401	2,419	2,438	2,456	2,475
320	2,493	2,511	2,530	2,548	2,567
330	2,585	2,603	2,622	2,640	2,659
340	2,677	2,696	2,715	2,734	2,753
350	2,772	2,791	2,809	2,828	2,846
360	2,865	2,884	2,903	2,921	2,940
370	2,959	2,978	2,997	3,016	3,035

$t, ^\circ\text{C}$	0	2	4	6	8
380	3,053	3,072	3,091	3,110	3,129
390	3,148	3,167	3,186	3,205	3,224
400	3,243	3,262	3,281	3,300	3,319
410	3,338	3,357	3,376	3,395	3,414
420	3,434	3,453	3,472	3,491	3,510
430	3,530	3,549	3,568	3,587	3,606
440	3,626	3,645	3,664	3,683	3,702
450	3,722	3,741	3,760	3,779	3,798
460	3,818	3,837	3,856	3,875	3,895
470	3,915	3,935	3,954	3,974	3,993
480	4,013	4,033	4,052	4,071	4,091
490	4,111	4,131	4,151	4,170	4,190
500	4,210	4,230	4,249	4,268	4,289
510	4,309	4,329	4,349	4,369	4,388
520	4,408	4,428	4,448	4,467	4,487
530	4,507	4,527	4,547	4,567	4,587
540	4,607	4,627	4,647	4,667	4,687
550	4,707	4,727	4,747	4,768	4,788
560	4,808	4,828	4,848	4,869	4,889
570	4,909	4,929	4,949	4,970	4,990
580	5,010	5,030	5,050	5,071	5,091
590	5,111	5,131	5,151	5,172	5,192
600	5,212	5,233	5,253	5,274	5,294
610	5,314	5,335	5,356	5,376	5,397
620	5,417	5,438	5,458	5,479	5,500
630	5,520	5,541	5,561	5,582	5,603
640	5,623	5,644	5,664	5,685	5,706
650	5,726	5,747	5,768	5,789	5,809
660	5,830	5,850	5,871	5,892	5,913
670	5,934	5,955	5,976	5,997	6,018
680	6,039	6,060	6,081	6,102	6,123
690	6,144	6,165	6,186	6,207	6,228
700	6,249	6,270	6,292	6,313	6,334
710	6,354	6,375	6,397	6,418	6,439
720	6,460	6,481	6,503	6,524	6,545
730	6,566	6,588	6,609	6,630	6,652
740	6,673	6,694	6,716	6,737	6,759
750	6,780	6,802	6,823	6,845	6,866
760	6,887	6,909	6,930	6,952	6,973
770	6,994	7,016	7,037	7,059	7,080
780	7,102	7,124	7,146	7,167	7,189
790	7,211	7,232	7,254	7,276	7,298
800	7,320	7,342	7,364	7,385	7,407
810	7,429	7,451	7,473	7,494	7,516
820	7,538	7,560	7,582	7,604	7,626
830	7,648	7,670	7,692	7,714	7,736
840	7,758	7,780	7,802	7,824	7,846

t, °C	0	2	4	6	8
850	7,868	7,890	7,192	7,935	7,957
860	7,979	8,001	8,023	8,046	8,068
870	8,090	8,112	8,135	8,158	8,180
880	8,202	8,224	8,247	8,270	8,292
890	8,314	8,336	8,359	8,381	8,404
900	8,486	8,449	8,472	8,494	8,516
910	8,538	8,560	8,583	8,606	8,629
920	8,651	8,673	8,696	8,718	8,741
930	8,764	8,787	8,809	8,832	8,855
940	8,878	8,900	8,923	8,946	8,969
950	8,992	9,015	9,037	9,060	9,083
960	9,106	9,129	9,152	9,175	9,197
970	9,220	9,243	9,266	9,289	9,312
980	9,335	9,358	9,381	9,404	9,427
990	9,450	9,473	9,496	9,520	9,543
1000	9,566	9,589	9,612	9,636	9,658
1010	9,682	9,705	9,728	9,752	9,775
1020	9,798	9,821	9,844	9,868	9,891
1030	9,915	9,938	9,961	9,985	10,008
1040	10,032	10,055	10,078	10,102	10,125
1050	10,149	10,173	10,196	10,220	10,243
1060	10,267	10,291	10,314	10,338	10,361
1070	10,385	10,409	10,432	10,456	10,479
1080	10,503	10,527	10,551	10,574	10,598
1090	10,622	10,646	10,670	10,693	10,717
1100	10,741	10,765	10,789	10,812	10,836
1110	10,860	10,884	10,908	10,932	10,956
1120	10,980	11,004	11,028	11,052	11,076
1130	11,100	11,124	11,148	11,172	11,196
1140	11,220	11,244	11,268	11,293	11,317
1150	11,341	11,365	11,390	11,414	11,438
1160	11,462	11,486	11,510	11,535	11,559
1170	11,583	11,607	11,632	11,656	11,681
1180	11,705	11,729	11,754	11,778	11,803
1190	11,827	11,852	11,876	11,901	11,926
1200	11,950	11,974	11,998	12,022	12,046
1210	12,070	12,094	12,118	12,142	12,166
1220	12,190	12,214	12,238	12,262	12,286

t, °C	0	2	4	6	8
1230	12,311	12,335	12,359	12,383	12,407
1240	12,431	12,455	12,479	12,503	12,527
1250	12,551	12,575	12,599	12,623	12,647
1260	12,671	12,695	12,719	12,743	12,767
1270	12,791	12,815	12,839	12,863	12,887
1280	12,911	12,935	12,959	12,984	13,008
1290	13,032	13,056	13,080	13,105	13,129
1300	13,153	13,177	13,201	13,226	13,250
1310	13,274	13,298	13,322	13,346	13,370
1320	13,394	13,418	13,442	13,467	13,491
1330	13,515	13,539	13,563	13,587	13,611
1340	13,635	13,659	13,683	13,707	13,731
1350	13,755	13,779	13,803	13,827	13,851
1360	13,875	13,899	13,923	13,947	13,971
1370	13,995	14,019	14,043	14,068	14,092
1380	14,116	14,140	14,164	14,188	14,212
1390	14,236	14,260	14,284	14,308	14,332
1400	14,356	14,380	14,404	14,428	14,452
1410	14,476	14,500	14,524	14,548	14,572
1420	14,596	14,620	14,644	14,669	14,693
1430	14,717	14,741	14,765	14,789	14,813
1440	14,837	14,861	14,885	14,909	14,933
1450	14,957	14,981	15,005	15,029	15,053
1460	15,077	15,101	15,125	15,149	15,173
1470	15,197	15,221	15,245	15,270	15,294
1480	15,318	15,342	15,366	15,390	15,414
1490	15,438	15,462	15,486	15,510	15,534
1500	15,558	15,582	15,606	15,630	15,654
1510	15,678	15,702	15,726	15,750	15,774
1520	15,798	15,822	15,846	15,871	15,895
1530	15,919	15,943	15,967	15,991	16,015
1540	16,039	16,063	16,087	16,111	16,135
1550	16,159	16,183	16,207	16,231	16,255
1560	16,279	16,203	16,327	16,351	16,375
1570	16,399	16,423	16,447	16,472	16,496
1580	16,520	16,544	16,568	16,592	16,616
1590	16,640	16,664	16,688	16,712	16,736
1600	16,760	—	—	—	—

Таблица 8.18

Стандартная градуировочная таблица термо-э. д. с. термopары НК — СА*. мв [13]

Допустимая погрешность $\pm 0,15$ мв. Температура свободных концов 0°C.

t, °C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
300	0,38	0,48	0,58	0,68	0,80	0,92	1,04	1,17	1,31	1,45
400	1,60	1,75	1,92	2,08	2,25	2,43	2,62	2,81	3,00	3,20
500	3,41	3,60	3,79	3,98	4,17	4,37	4,56	4,76	4,96	5,16
600	5,36	5,56	5,77	5,97	6,17	6,38	6,58	6,78	6,98	7,19
700	7,39	7,59	7,79	8,00	8,20	8,40	8,60	8,80	9,01	9,21
800	9,41	9,61	9,82	10,02	10,22	10,42	10,62	10,82	11,02	11,22
900	11,42	11,62	11,82	12,02	12,21	12,41	12,61	12,80	13,00	13,20
1000	13,39	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* В интервале 0—80°C термо-э. д. с. практически равна 0.

Градуировочная таблица термо-э. д. с. термопары W + 5% Re — W + 20% Re, мВ [13, 21, 23]

Температура свободных концов 0°C.

t, °C	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275
0	0,00	0,25	0,6	0,9	1,3	1,6	1,9	2,3	2,6	3,0	3,4	3,8
300	4,2	4,6	5,0	5,4	5,8	6,2	6,6	7,0	7,5	7,9	8,4	8,8
600	9,3	9,7	10,1	10,5	11,0	11,4	11,8	12,2	12,6	13,0	13,4	13,8
900	14,2	14,6	15,0	15,4	15,9	16,3	16,7	17,1	17,5	17,9	18,3	18,7
1200	19,0	19,4	19,8	20,1	20,5	20,8	21,1	21,4	21,7	22,0	22,3	22,6
1500	22,9	23,2	23,5	23,8	24,0	24,3	24,6	24,8	25,1	25,4	25,6	25,9
1800	26,2	26,4	26,6	26,9	27,1	27,3	27,6	27,8	28,0	28,3	28,5	28,8
2100	29,0	29,2	29,4	29,6	29,9	30,1	30,3	30,5	30,7	30,9	31,2	—
2400	31,5	—	32,0	—	32,3	—	32,7	—	33	—	—	—

Таблица 8.20

Продолжение табл. 8.20

Стандартная градуировочная таблица термо-э. д. с. термопары Pt + 6% Rh — Pt + 30% Rh, мВ [13, 19]

Допустимая погрешность градуировки $\pm [0,01 + 3,3 \cdot 10^{-5} (t - 300)]$, мВ. Температура свободных концов 0°C.

t, °C	0	5	t, °C	0	5
300	0,456	0,471	680	2,330	2,364
310	0,487	0,503	690	2,398	2,432
320	0,520	0,536	700	2,467	2,501
330	0,553	0,570	710	2,536	2,571
340	0,587	0,604	720	2,607	2,642
350	0,622	0,640	730	2,678	2,714
360	0,658	0,676	740	2,750	2,786
370	0,695	0,714	750	2,823	2,860
380	0,733	0,752	760	2,897	2,934
390	0,772	0,792	770	2,972	3,010
400	0,812	0,832	780	3,048	3,086
410	0,853	0,874	790	3,124	3,162
420	0,895	0,916	800	3,201	3,240
430	0,938	0,960	810	3,279	3,318
440	0,983	1,005	820	3,358	3,398
450	1,028	1,051	830	3,438	3,478
460	1,074	1,097	840	3,519	3,559
470	1,121	1,145	850	3,600	3,641
480	1,169	1,193	860	3,682	3,723
490	1,218	1,243	870	3,765	3,807
500	1,268	1,293	880	3,849	3,891
510	1,319	1,345	890	3,934	3,976
520	1,371	1,397	900	4,019	4,062
530	1,424	1,451	910	4,105	4,148
540	1,478	1,505	920	4,192	4,235
550	1,532	1,560	930	4,279	4,323
560	1,588	1,616	940	4,368	4,412
570	1,645	1,673	950	4,457	4,502
580	1,702	1,731	960	4,547	4,592
590	1,761	1,791	970	4,637	4,682
600	1,821	1,851	980	4,728	4,774
610	1,881	1,912	990	4,820	4,866
620	1,943	1,974	1000	4,913	4,959
630	2,005	2,036	1010	5,006	5,053
640	2,068	2,100	1020	5,100	5,147
650	2,132	2,165	1030	5,195	5,242
660	2,198	2,231	1040	5,290	5,338
670	2,264	2,297	1050	5,386	5,434

t, °C	0	5	t, °C	0	5
1060	5,483	5,532	1500	10,274	10,333
1070	5,581	5,630	1510	10,392	10,451
1080	5,679	5,728	1520	10,511	10,570
1090	5,777	5,826	1530	10,630	10,689
1100	5,876	5,926	1540	10,749	10,809
1110	5,976	6,026	1550	10,869	10,929
1120	6,077	6,127	1560	10,989	11,049
1130	6,178	6,229	1570	11,109	11,169
1140	6,280	6,331	1580	11,229	11,289
1150	6,382	6,433	1590	11,350	11,410
1160	6,485	6,536	1600	11,471	11,531
1170	6,588	6,640	1610	11,592	11,652
1180	6,692	6,744	1620	11,713	11,773
1190	6,797	6,849	1630	11,834	11,895
1200	6,902	6,955	1640	11,956	12,017
1210	7,008	7,061	1650	12,078	12,139
1220	7,114	7,167	1660	12,200	12,261
1230	7,221	7,274	1670	12,323	12,384
1240	7,328	7,382	1680	12,445	12,506
1250	7,436	7,490	1690	12,568	12,629
1260	7,544	7,598	1700	12,691	12,752
1270	7,653	7,707	1710	12,814	12,875
1280	7,765	7,817	1720	12,937	12,998
1290	7,872	7,927	1730	13,060	13,122
1300	7,982	8,037	1740	13,184	13,245
1310	8,093	8,148	1750	13,307	13,369
1320	8,204	8,259	1760	13,431	13,493
1330	8,315	8,371	1770	13,555	13,617
1340	8,427	8,483	1780	13,679	13,741
1350	8,540	8,596	1790	13,803	13,865
1360	8,653	8,709	1800	13,927	—
1370	8,766	8,823			
1380	8,880	8,937			
1390	8,994	9,051			
1400	9,109	9,166			
1410	9,224	9,281			
1420	9,339	9,397			
1430	9,455	9,513			
1440	9,571	9,629			
1450	9,687	9,745			
1460	9,804	9,862			
1470	9,921	9,979			
1480	10,038	10,097			
1490	10,156	10,215			

Градуировочные значения термо-э. д. с. некоторых высокотемпературных термопар, мв [4. 24]

Температура свободных концов термопары никель — нихром 20°C, остальных термопар — 0°C.

$t, ^\circ\text{C}$	Никель — нихром	Нихром — константан	Ir+10%Ru — Ir+10%Rh	Ir—Ir+60%Rh	Ir—Ir+10%Ru	W—Mo	$t, ^\circ\text{C}$	Никель — нихром	Нихром — константан	Ir+10%Ru — Ir+10%Rh	Ir—Ir+60%Rh	Ir—Ir+10%Ru	W—Mo
100	3,25	5,62	—	—	—	—	1100	44,80	—	6,83	6,05	2,73	—0,9
200	7,30	11,08	—	1,10	—	—	1200	48,95	—	7,38	6,60	3,00	—0,5
300	11,40	19,09	1,66	1,65	—	—	1300	—	—	7,91	7,11	3,24	+0,5
400	15,50	26,48	—	2,20	—	—	1400	—	—	8,41	7,65	3,47	0,6
500	19,80	34,18	—	2,75	—	—	1500	—	—	8,89	8,20	3,68	1,3
600	24,05	41,95	3,64	3,30	—	—	1600	—	—	9,35	8,70	3,87	2,0
700	28,30	50,02	—	3,85	—	—	1700	—	—	9,81	9,25	4,09	2,9
800	32,30	57,94	—	4,40	—	—	1800	—	—	10,26	9,80	4,19	—
900	36,45	65,76	—	4,95	—	—	2000	—	—	—	10,26	—	9,5*
1000	40,63	—	6,24	5,50	2,45	—1,3							

* Термо-э. д. с. при 2400°C.

8.5. КОНДЕНСАЦИОННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Конденсационная термометрия основана на зависимости от температуры давления насыщенного пара

термометрической жидкости, заключенной в постоянный объем. Область применения конденсационного термометра ограничена снизу температурой затвердевания, а сверху — критической температурой термометрической жидкости.

Таблица 8.22

Рабочие интервалы некоторых конденсационных термометров [25]

Термометрическая жидкость	Температура, °К	Термометрическая жидкость	Температура, °К	Термометрическая жидкость	Температура, °К	Термометрическая жидкость	Температура, °К
^3He	0,3—3,3	Ar	84—149	H_2 (равновесный)	14—20	N_2	63—73
^4He	0,5—5,2	O_2	55—90	Ne	24—44,4	C_3H_8	90—191

Таблица 8.23

Давление насыщенного пара пропана [26]

$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{ мм рт. ст.}$	$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{ мм рт. ст.}$	$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{ мм рт. ст.}$
—130	0,00012	—50	0,721	15	7,442
—120	0,0041	—45	0,908	20	8,498
—110	0,0118	—40	1,137	25	9,676
—100	0,030	—35	1,406	30	11,02
—95	0,045	—30	1,705	35	12,46
—90	0,066	—25	2,057	40	14,01
—85	0,095	—20	2,471	45	15,76
—80	0,133	—15	2,946	50	17,61
—75	0,184	—10	3,472		
—70	0,249	—5	4,094		
—65	0,332	0	4,776		
—60	0,435	5	5,561		
—55	0,563	10	6,464		

Температура конденсации некоторых термометрических жидкостей, °K [26, 27]

Ч

 P — давление насыщенного пара.

P , мм рт. ст.	H_2 , равновесный	H_2 , нормальный	N_2	O_2	P , мм рт. ст.	H_2 , равновесный	H_2 , нормальный	N_2	O_2
2,0	10,02	10,02	—	56,28	200	16,49	16,60	67,57	79,14
2,0	10,23	10,32	—	57,07	210	16,61	16,715	67,88	79,49
3,0	10,38	10,50	—	57,73	220	16,715	16,835	68,18	79,82
3,5	10,53	10,64	—	58,29	230	16,825	16,94	68,48	80,16
4,0	10,65	10,76	—	58,80	240	16,93	17,05	68,75	80,48
5,0	10,88	10,98	—	59,68	250	17,03	17,15	69,02	80,78
6,0	11,08	11,17	—	60,39	260	17,13	17,25	69,28	81,07
7,0	11,23	11,34	—	61,01	270	17,22	17,34	69,53	81,36
8,0	11,36	11,47	—	61,58	280	17,325	17,435	69,77	81,65
9,0	11,50	11,59	—	62,07	290	17,415	17,53	70,01	81,92
10	11,62	11,72	—	62,50	300	17,50	17,62	70,25	82,18
12	11,83	11,92	—	63,32	320	17,67	17,79	70,70	82,68
14	12,02	12,115	—	64,00	340	17,835	17,96	71,13	83,16
16	12,175	12,28	55,65	64,59	360	18,00	18,11	71,54	83,62
18	12,32	12,43	—	65,17	380	18,15	18,26	71,92	84,06
20	12,46	12,57	56,48	65,67	400	18,29	18,405	72,30	84,48
25	12,74	12,85	—	66,74	420	18,435	18,55	72,66	84,89
30	12,99	13,09	58,08	67,67	440	18,57	18,69	73,00	85,29
35	13,21	13,30	—	68,46	460	18,69	18,22	73,34	85,65
40	13,40	13,51	59,28	69,15	480	18,82	18,945	73,66	86,01
45	13,575	13,67	—	69,81	500	18,94	19,06	73,97	86,37
50	13,73	13,83	60,24	70,39	520	19,065	19,185	74,27	86,72
60	14,04	14,15	61,06	71,39	540	19,185	19,30	74,56	87,06
70	14,30	14,42	61,77	72,29	560	19,30	19,41	74,85	87,38
80	14,56	14,68	62,39	73,09	580	19,40	19,52	75,13	87,69
90	14,77	14,89	62,94	73,80	600	19,50	19,62	75,41	87,99
100	15,00	15,10	63,50	74,47	620	19,60	19,72	75,68	88,29
110	15,18	15,29	64,03	75,08	640	19,70	19,825	75,93	88,58
120	15,35	15,47	64,52	75,64	660	19,80	19,92	76,18	88,86
130	15,52	15,64	64,98	76,16	680	19,90	20,02	76,43	89,14
140	15,68	15,80	65,42	76,65	700	20,00	20,11	76,67	89,41
150	15,83	15,95	65,81	77,13	720	20,09	20,21	76,91	89,67
160	15,97	16,10	66,20	77,57	740	20,18	20,30	77,14	89,93
170	16,10	16,23	66,56	77,98	760	20,273	20,39	77,364	90,18
180	16,235	16,365	66,91	78,39	780	20,37	20,48	77,58	90,43
190	16,36	16,485	67,25	78,77	800	20,44	20,56	—	90,69

Градуировочная таблица конденсационного ^3He -термометра (низкотемпературная шкала T_{62}) [9]Приводится давление насыщенного пара ^3He , мм рт. ст., при ускорении земного притяжения $g = 980,665 \text{ см/сек}^2$.

$T, ^\circ\text{K}$	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,2	0,0000121	0,0000244	0,0000463	0,0000835	0,0001441	0,0002388	0,0003819	0,0005917	0,0008911	0,0013082
0,3	0,001877	0,002636	0,003633	0,004291	0,006516	0,008619	0,011173	0,014304	0,018105	0,022673
0,4	0,028115	0,034546	0,042086	0,050864	0,061017	0,072686	0,086022	0,101179	0,118319	0,137610
0,5	0,159224	0,183339	0,210139	0,239811	0,272542	0,308540	0,347992	0,391106	0,438087	0,489145
0,6	0,544490	0,604337	0,668902	0,738402	0,813059	0,893094	0,978729	1,070189	1,167698	1,271483
0,7	1,381771	1,498789	1,622766	1,753428	1,892506	2,038728	2,192821	2,355017	2,525542	2,704626
0,8	2,892496	3,089381	3,295508	3,511105	3,736398	3,971613	4,216976	4,472711	4,739044	5,016198
0,9	5,304397	5,603862	5,916279	6,237476	6,572071	6,918813	7,277923	7,649620	8,034121	8,431641
1,0	8,842	9,267	9,704	10,156	10,622	11,102	11,597	12,106	12,631	13,170
1,1	13,725	14,295	14,881	15,484	16,102	16,737	17,388	18,056	18,741	19,443
1,2	20,163	20,900	21,655	22,428	23,220	24,029	24,857	25,704	26,571	27,456
1,3	28,360	29,285	30,229	31,193	32,177	33,181	34,206	35,252	36,319	37,407
1,4	38,516	39,646	40,799	41,973	43,169	44,388	45,629	46,893	48,179	49,489
1,5	50,822	52,178	53,558	54,961	56,389	57,840	59,316	60,817	62,342	63,897
1,6	65,467	67,068	68,694	70,345	72,022	73,726	75,455	77,211	78,993	80,802
1,7	82,638	84,501	86,391	88,309	90,254	92,228	94,229	96,258	98,315	100,402
1,8	102,516	104,660	106,833	109,035	111,266	113,527	115,818	118,138	120,489	122,870
1,9	125,282	127,724	130,197	132,701	135,236	137,803	140,401	143,031	145,692	148,386
2,0	151,112	153,870	156,661	159,485	162,342	165,232	168,155	171,112	174,102	177,126
2,1	180,184	183,276	186,403	189,564	192,760	195,990	199,256	202,557	205,894	209,266
2,2	212,673	216,117	219,597	223,113	226,665	230,255	233,881	237,544	241,244	244,982
2,3	248,757	252,570	256,420	260,309	264,236	268,202	272,206	276,249	280,331	284,452
2,4	288,613	292,813	297,053	301,333	305,653	310,013	314,414	318,855	323,337	327,861
2,5	332,425	337,031	341,679	346,368	351,100	355,874	360,690	365,549	370,450	375,395
2,6	380,383	385,414	390,489	395,608	400,771	405,599	411,230	416,526	421,868	427,264
2,7	432,686	438,164	443,687	449,256	454,872	460,534	466,242	471,998	477,801	483,651
2,8	489,549	495,495	501,488	507,531	513,622	519,762	525,951	532,189	538,477	544,815
2,9	551,203	557,692	564,131	570,672	577,264	583,907	590,602	597,349	604,149	611,002
3,0	617,907	624,866	631,879	638,945	646,066	653,241	660,472	667,757	675,098	682,496
3,1	689,949	697,459	705,026	712,650	720,332	728,072	735,871	743,728	751,644	759,620
3,2	767,656	775,753	783,910	792,139	800,408	808,750	817,155	825,622	834,153	842,747
3,3	851,406	860,130	868,918	—	—	—	—	—	—	—

Градуировочная таблица конденсационного ^4He -термометра (низкотемпературная шкала T_{68}) [27]Приводится давление насыщенного пара ^4He , *мл рт. ст.*, при ускорении земного притяжения $g = 981,56 \text{ см/сек}^2$.

$T, ^\circ\text{K}$	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,5	0,0000163	0,0000228	0,0000314	0,0000427	0,0000574	0,0000766	0,000101	0,000132	0,000172	0,000221
0,6	0,000282	0,000357	0,000450	0,000563	0,000699	0,000863	0,00106	0,00129	0,00157	0,00190
0,7	0,00228	0,00273	0,00326	0,00387	0,00457	0,00537	0,00630	0,00736	0,00856	0,00993
0,8	0,0115	0,0132	0,0152	0,0174	0,0199	0,0226	0,0257	0,0291	0,0329	0,0371
0,9	0,0417	0,0468	0,0524	0,0585	0,0652	0,0726	0,0806	0,0893	0,0988	0,1091
1,0	0,1203	0,1324	0,1455	0,1596	0,1748	0,1912	0,2088	0,2277	0,2480	0,2697
1,1	0,2930	0,3178	0,3443	0,3725	0,4026	0,4346	0,4686	0,5048	0,5431	0,5837
1,2	0,6267	0,6722	0,7203	0,7711	0,8248	0,8813	0,9409	1,0036	1,0696	1,1390
1,3	1,2118	1,2883	1,3685	1,4527	1,5408	1,6330	1,7296	1,8305	1,9360	2,0462
1,4	2,1612	2,2812	2,4063	2,5366	2,6723	2,8136	2,9606	3,1135	3,2724	3,4374
1,5	3,6088	3,7866	3,9711	4,1624	4,3606	4,5660	4,7786	4,9987	5,2264	5,4619
1,6	5,7054	5,9569	6,2168	6,4850	6,7619	7,0476	7,3422	7,6459	7,9590	8,2815
1,7	8,6136	8,9555	9,3073	9,6692	10,041	10,424	10,817	11,222	11,637	12,063
1,8	12,500	12,949	13,409	13,881	14,365	14,861	15,369	15,889	16,422	16,968
1,9	17,526	18,097	18,681	19,278	19,888	20,511	21,148	21,799	22,463	23,141
2,0	23,832	24,537	25,257	25,990	26,737	27,498	28,273	29,062	29,865	30,682
2,1	31,514	32,359	33,218	34,091	34,978	35,878	36,791	37,717	38,655	39,608
2,2	40,576	41,559	42,559	43,575	44,607	45,655	46,720	47,802	48,901	50,017
2,3	51,151	52,302	53,471	54,657	55,862	57,085	58,326	59,585	60,864	62,161
2,4	63,476	64,811	66,165	67,538	68,930	70,343	71,775	73,227	74,699	76,191
2,5	77,704	79,237	80,791	82,366	83,962	85,579	87,218	88,878	90,559	92,263
2,6	93,988	95,736	97,505	99,297	101,11	102,95	104,81	106,69	108,60	110,53
2,7	112,48	114,45	116,45	118,48	120,52	122,59	124,69	126,81	128,95	131,12
2,8	133,31	135,53	137,77	140,04	142,33	144,65	147,00	149,37	151,76	154,18
2,9	156,63	159,10	161,60	164,13	166,68	169,26	171,87	174,50	177,16	179,85
3,0	182,57	185,31	188,08	190,88	193,71	196,57	199,45	202,37	205,31	208,28
3,1	211,28	214,31	217,37	220,46	223,58	226,73	229,91	233,12	236,35	239,62
3,2	242,92	246,25	249,62	253,01	256,43	259,89	263,37	266,89	270,44	274,02
3,3	277,63	281,28	284,96	288,67	292,41	296,18	299,99	303,83	307,71	311,61
3,4	315,55	319,53	323,53	327,57	331,65	335,76	339,90	344,07	348,29	352,53
3,5	356,81	361,13	365,48	369,86	374,28	378,74	383,23	387,76	392,33	396,93
3,6	401,56	406,23	410,94	415,68	420,46	425,28	430,13	435,03	439,95	444,92
3,7	449,92	454,96	460,04	465,16	470,31	475,51	480,74	486,01	491,32	496,66
3,8	502,05	507,47	512,94	518,44	523,98	529,57	535,19	540,85	546,56	552,30
3,9	558,09	563,91	569,78	575,69	581,64	587,63	593,66	599,74	605,85	612,01
4,0	618,21	624,46	630,74	637,07	643,44	649,86	656,32	662,82	669,37	675,96
4,1	682,59	689,27	695,99	702,76	709,57	716,42	723,32	730,27	737,25	744,29
4,2	751,37	758,49	765,66	772,87	780,13	787,43	794,78	802,17	809,62	817,11
4,3	824,65	832,23	839,87	847,55	855,29	863,07	870,89	878,77	886,70	894,68
4,4	902,71	910,78	918,91	927,09	935,31	943,59	951,92	960,30	968,73	977,21
4,5	985,74	994,32	1003,0	1011,6	1020,4	1029,2	1038,0	1046,9	1055,9	1064,9
4,6	1073,9	1083,1	1092,2	1101,4	1110,7	1120,0	1129,4	1138,9	1148,4	1157,9
4,7	1167,5	1177,2	1186,9	1196,7	1206,5	1216,4	1226,3	1236,3	1246,4	1256,5
4,8	1266,6	1276,9	1287,2	1297,5	1307,9	1318,4	1328,9	1339,5	1350,1	1360,8
4,9	1371,6	1382,4	1393,3	1404,2	1415,2	1426,3	1437,4	1448,6	1459,9	1471,2
5,0	1482,6	1494,0	1505,5	1517,1	1528,7	1540,4	1552,1	1563,9	1575,8	1587,8
5,1	1599,8	1611,9	1624,0	1636,2	1648,5	1660,8	1673,2	1685,7	1698,2	1710,8
5,2	1723,5	1736,2	1749,0	—	—	—	—	—	—	—

8.6. ОПТИЧЕСКАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ (ПИРОМЕТРИЯ) И ТЕРМОИНДИКАТОРЫ

Оптическая пирометрия основана на измерении интенсивности излучения нагретого тела, которая связана с его температурой законами теплового излучения или термического равновесия. Различают спектральную (яркостную), радиационную и цветовую пирометрию. Область применимости оптической пирометрии ограничена чувствительностью приемников излучения, поскольку с понижением температуры интенсивность излучения уменьшается.

Спектральная (яркостная) пирометрия основана на измерении интенсивности излучения при фиксированной длине волны. При этом спектральный пирометр калибруется по излучению (на той же длине волны) абсолютно черного тела в градусах *яркостной температуры* T_λ , связанной с термодинамической температурой T соотношением

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_\lambda} = \frac{\lambda}{1,4380} \ln \varepsilon(\lambda, T),$$

где λ — длина волны; $\varepsilon(\lambda, T)$ — излучательная способность тела на длине волны λ при температуре T (табл. 8.27 и 8.28).

Таблица 8.27

Продолжение табл. 8.27

**Спектральная излучательная способность $\epsilon(\lambda, T)$
веществ [6, 13, 28]**

Дробные значения ϵ соответствуют температуре плавления: числитель для твердой фазы, знаменатель для жидкой фазы.

Вещество	λ , мкм	T , °К	$\epsilon(\lambda, T)$
Алюмель	0,66	—	0,37
Алюминий*	0,66	1000	0,12
	0,66	1300	0,13
Бериллий	0,55	—	0,61/0,81
	0,65	—	0,61/0,61
Ванадий	0,55	—	0,29/—
	0,65	—	0,35/0,32
Вольфрам*	0,66	—	0,43/—
Железо*	0,65	—	0,35/0,39
	0,65	1500	0,37
	0,66	1000	0,27
	0,66	1300	0,39
	0,66	1500	0,37
	0,66	1600	0,37
	0,66	1800	0,35
Золото	0,65	—	0,14/0,22
Иридий	0,65	—	0,30/—
Кобальт	0,55	—	0,36/0,37
Константан	0,66	—	0,35
Магний	0,65	—	0,59/0,59
Медь	0,55	—	0,38/0,36
	0,65	—	0,10/0,15
	0,66	1000	0,11
	0,66	1275	0,105
	0,66	1350	0,12
	0,66	1375	0,15
	0,66	1450	0,14
	0,66	1500	0,13
Молибден	0,65	—	0,43/0,50
	0,66	900	0,08
	0,66	1600	0,37
	0,66	2500	0,35
	0,665	300	0,420
	0,665	1300	0,378
	0,665	2000	0,353
	0,665	2750	0,332
Монель	0,66	—	0,37
Никель	0,46	1200—1600	0,450
	0,535	1200—1600	0,425
	0,65	—	0,36/0,37
	0,66	1000	0,38
	0,66	1600	0,38
	0,66	1800	0,39
	0,665	1200—1650	0,375
	0,55	—	0,61/—
	0,65	—	0,49/0,40
	0,66	1300—2200	0,374
Оксиды:			
алюминия	0,66	1300	0,14
	0,66	1600	0,17
	0,66	2000	0,21
бериллия	—	—	0,35
ванадия	—	—	0,70
железа	—	—	0,70
иттрия	—	—	0,60
кобальта	—	—	0,75

Вещество	λ , мкм	T , °К	$\epsilon(\lambda, T)$
Оксиды:			
магния	0,66	1300	0,18
	0,66	1400	0,23
	0,66	1700	0,35
	0,66	2000	0,47
меди	—	—	0,70
никеля	—	—	0,90
ниобия	—	—	0,70
титана	—	—	0,50
тория	—	—	0,50
урана	—	—	0,30
хрома	—	—	0,70
циркония	—	—	0,40
Палладий	0,55	—	0,33/—
Платина*	0,65	—	0,33/0,38
	0,66	1000	0,29
	0,66	2000	0,31
Платинородий (10%Rh)	0,66	—	0,27
Родий	0,65	—	0,29/0,30
Свинец	0,65	—	0,30/0,38
Серебро*	0,65	—	0,04/0,07
	0,66	1000	0,05
	0,66	1300	0,07
Смесь Нериста (85%ZrO ₂ —15%V ₂ O ₅)	0,66	1300	0,16
	0,66	1400	0,23
	0,66	1600	0,36
	0,66	1800	0,50
	0,66	2000	0,70
Сталь* X25Ю5 (окисленная)	—	—	0,75
Сталь X18Н9 (окисленная)	—	—	0,85
Тантал	0,467	300	0,565
	0,467	1400	0,505
	0,467	2100	0,460
	0,66	1200—2900	0,40
	0,665	300	0,493
	0,665	1400	0,442
	0,665	2100	0,415
	0,665	2800	0,319
Торий	0,55	—	0,65/—
	0,65	—	0,36/0,40
Уголь	0,54—0,66	1000	0,92
	0,54—0,66	1600	0,90
	0,54—0,66	2000	0,87
	0,54—0,66	2500	0,84
Хром	0,55	—	0,53/—
	0,65	—	0,39/0,39
	0,66	1100—1500	0,334
Хромель	—	—	0,35
Цирконий	0,65	—	0,32/0,30

* См. также табл. 8.28.

Спектральная излучательная способность веществ при разных длинах волн [28] —

Вещество	T, °K	Длина волны λ, мкм								
		0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	1,0	2,0	4,0
Алюминий	300	0,70	0,37	0,24	0,18	0,17	0,17	0,17	0,16	0,08
Вольфрам	300	—	—	—	0,50	0,47	0,46	0,42	0,13	0,07
	1000	—	0,50	0,49	0,47	0,45	0,44	0,40	—	—
	2000	—	0,47	0,47	0,46	0,45	0,43	0,38	0,23	0,13
	3000	—	0,45	0,46	0,44	0,43	0,42	0,36	0,26	0,20
	3400	—	0,48	0,46	0,44	0,40	—	0,36	0,26	0,186
Графит	300	—	—	—	—	0,96	0,91	0,88	0,82	0,77
Железо	300	0,73	0,57	0,47	0,44	0,42	0,41	0,35	0,22	0,11
Платина	300	0,63	0,58	0,48	0,41	0,36	0,31	0,27	0,13	0,10
Серебро	300	0,80	0,87	0,15	0,08	0,06	0,05	0,04	0,02	0,01
Сталь	300	—	0,63	0,50	0,45	0,44	0,42	0,37	0,23	0,13
Уголь	300	—	—	0,86	0,86	0,85	0,84	0,81	0,81	0,75

Цветовая пирометрия основана на сравнении интенсивностей излучения двух различных длин волн λ_1 , λ_2 . Пирометр калибруется в шкале *цветовой температуры* T_c , связанной с термодинамической шкалой соотношением

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} = \frac{1}{1,4380} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \ln \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)}.$$

Цветовая температура так называемых серых тел, характеризующихся условием $\varepsilon(\lambda_1, T) = \varepsilon(\lambda_2, T)$, совпадает с истинной.

Таблица 8.2^о

Полная излучательная способность веществ $\varepsilon(T)$ в направлении, перпендикулярном к излучающей поверхности [3, 6, 13, 28]

Вещество	T, °K	$\varepsilon(T)$
Алюминий	300	0,022
	375	0,028
	500	0,039
	775	0,060
	900	0,060
Алюминий окисленный	475	0,11
	875	0,19
	311	0,06*
	311	0,32*
	311	0,753*
Алюминия окись	1500	0,23
	2000	0,34
Висмут	300	0,048
	375	0,061
Вода (лед)	270	0,76
Вольфрам	300	0,024
	375	0,032
	775	0,071
	1200	0,138

* Толщина окисной пленки 0,25 мкм.

** Толщина окисной пленки 1 мкм.

*** Толщина окисной пленки 7 мкм.

Радиационная пирометрия основана на измерении полного излучения; пирометр градуируется по полному излучению абсолютно черного тела в градусах *радиационной температуры* T_r , которая связана с термодинамической температурой соотношением

$$T_r = T \sqrt[4]{\varepsilon(T)},$$

где $\varepsilon(T)$ — полная излучательная способность вещества. Применение радиационных пирометров наиболее эффективно при низких температурах, когда спектральная излучательная способность мала.

Продолжение табл. 8.29

Вещество	T, °K	$\varepsilon(T)$
Вольфрам	1500	0,192
	1800	0,236
	2000	0,259
	2200	0,278
	2500	0,301
	2700	0,315
	2900	0,329
	3200	0,341
	3400	0,348
Железо	375	0,05
	450	0,05
Железо: литое	—	0,21
оцинкованное	365	0,07
окисленное	375	0,74
	775	0,84
	1475	0,89
Железа окись	1800	0,80
Золото	375	0,02
	775	0,03
Золото окисленное	375	0,37
Кальция окись	1300	0,27
Кирпич обожженный	1275	0,75
огнеупорный	800	0,75
	1300	0,82
	1375	0,85
Латуни силикатный	300	0,035
полированная	300	0,06
листовая	300	0,06

Вещество	$T, ^\circ K$	$\epsilon(T)$
Латунь окисленная	475	0,61
	875	0,59
Магний	295	0,07
Магния окись	1300	0,16
	1500	0,17
	2000	0,200
Медь	300	0,04
	1400	0,15
Медь: хромированная	300	0,08
черная	300	0,78
полированная	300	0,03
окисленная	475	0,60
	1275	0,60
Мельхиор	373	0,059
Молибден	1275	0,13
	1775	0,19
	2275	0,24
Монель	366	0,16
Монель окисленный	300	0,41
Никель	300	0,04
	375	0,06
	500	0,07
	775	0,12
	1275	0,19
Никель окисленный	475	0,37
	1475	0,85
Ниобий	1775	0,19
	2275	0,24
Олово	300	0,043
	375	0,05
Платина	300	0,037
	375	0,047
	500	0,054
	775	0,096
	900	0,098
	1300	0,138
	1800	0,176
Ртуть	300	0,10
	375	0,12
Свинец	375	0,05
Свинец окисленный	295	0,28
	475	0,63
Серебро	375	0,020
	500	0,020
	775	0,035
	900	0,032
Смесь Нернста (85% ZrO_2 — 15% V_2O_5)	1300	0,025
	1500	0,027
	1800	0,042
	2000	0,055
Сталь	300	0,65
Сталь жидкая	—	0,28
Стекло	300	0,94
Уголь	375	0,81
Фарфор глазурованный	300	0,92
Хром	375	0,08
Цинк	300	0,05
Чугун: полированный	311	0,21
окисленный	311	0,63

Термоиндикаторы — вещества, изменяющие свой внешний вид (цвет, блеск, прозрачность, свечение и т. д.) при определенной температуре — *критической температуре термоиндикатора* $t_{кр}$ — и используемые для регистрации этой температуры. По природе дей-

Таблица 8.30

Характеристики термокрасок [29]

Краски 1а, 17 и 31 основаны на плавлении и обратимы; остальные — химического взаимодействия и необратимы. Паспортный режим: длительность теплового воздействия при $t_{кр}$ равна 2,5 мин.

Номер краски	Цвет при $t < t_{кр}$	$t_{кр}, ^\circ C$	Цвет при $t > t_{кр}$
1а	Светло-розовый	45	Голубой
17	»	55	»
31	Розовый	70	Зеленый
46	Светло-зеленый	74	Голубой
32	Светло-розовый	85—90	Ярко-голубой
13	Светло-зеленый	90	Светло-коричневый
1д	Белый	98	Зеленый
2д	»	105	Черный
50	Розовый	110	Фиолетовый
3д	Светло-зеленый	120	Темно-зеленый
4	Зеленый	125—130	Фиолетовый
30	Желтый	130	Оранжевый
8д	Желтый	140	Зеленый
4д	Оранжевый	140	Красный
19	Бирюзовый	145	Коричневый
5	Фиолетовый	150	Черный
5д	Бледно-сиреневый	150	»
6д	Белый	155	Желтый
7д	»	160	Черный
11д	»	160	Желтый
8*д	Желтый	165	Черный
29	Светло-розовый	175	Светло-коричневый
10д	Бирюзовый	175	Черный
2а	Сиреневый	180	Синий
14д	Розовый	185	Коричневый
6	Светло-зеленый	190	Черный
11*д	Белый	190	Темно-зеленый
12д	Малиновый	195	Черный
13д	Белый	200	Темно-коричневый
18	Бирюзовый	205	Розовый
230	Зеленый	220	Бежевый
240	Бирюзовый	225	Белый
8	Зеленый	240	Коричневый
320	Лилловый	250	Бежевый
35	Светло-розовый	280	Темно-бежевый
10	Сиреневый	280	Черно-синий
33	Бледно-сиреневый	320	»
26	Сиреневый	350	»
12	Синий	370	Бежевый
66	Белый	390	»
230*	Бежевый	400	Белый
470	Сине-зеленый	440—450	Серо-белый
47	Горчичный	470	Желтый
15	Оранжевый	470	Серый
480	Голубой	480	Серо-белый
490	Сине-зеленый	515	Бежевый
14	Ярко-розовый	550	Белый
52а	Черный	555	Темно-зеленый
30*	Оранжевый	570	Белый
7	Бледно-зеленый	690	Ярко-зеленый
100	Сиреневый	830	Светло-фиолетовый

ствия различают термоиндикаторы, меняющие структуру или агрегатное состояние; термоиндикаторы с химическим взаимодействием между компонентами; люминесцентные термоиндикаторы.

Термоиндикаторы, действие которых основано на изменении структуры (поверхностно-градиентные, термохромные индикаторы) или агрегатного состояния (индикаторы плавления) обладают стабильной критической температурой, не зависящей от теплового режима, и являются обратимыми. Критическая температура термоиндикаторов с химическим взаимодействием между компонентами стабильна, но зависит (иногда существенно) от теплового режима и давления. Поэтому при использовании в условиях, отличающихся от паспортных, эти термоиндикаторы нуждаются в предварительной градуировке. Большинство термоиндикато-

ров с химическим взаимодействием необратимы либо квазиобратимы. Последние регенерируют в результате взаимодействия с окружающей атмосферой. Люминесцентные термоиндикаторы обратимы, но нуждаются в градуировке, так как их свойства зависят от теплового режима и характеристик возбуждающего излучения.

Не обладая большой точностью, метод термоиндикаторов иногда полезен, а иногда и труднозаменим (при исследовании тепловых полей, в аэродинамических измерениях, при измерении температур токонесущих элементов и т. п.). Термоиндикаторы применяют в виде термолент (термолаков), термокарандашей и термосвидетелей (таблеток, пленок). В табл. 8.30 и 8.31 приведены характеристики наборов термолент и термопокрытий плавления, разработанных в СССР.

Таблица 8.31

Характеристики набора термопокрытий плавления [29]

Марка термопокрытия	Цвет при $t < t_{кр}$	$t_{кр}$, °C	Цвет при $t > t_{кр}$	Марка термопокрытия	Цвет при $t < t_{кр}$	$t_{кр}$, °C	Цвет при $t > t_{кр}$
ТП-36	Светло-розовый	36	Оранжевый	ТП-122	Розовый	122	Красный
ТП-44	Светло-зеленый	44	Зеленый	ТП-123	Голубой	123	Синий
ТП-52	Светло-голубой	52	Синий	ТП-126	»	126	»
ТП-60	Светло-розовый	60	Красный	ТП-130	Светло-зеленый	130	Зеленый
ТП-67	Розовый	67	»	ТП-134	Светло-оранжевый	134	Красный
ТП-79	Светло-зеленый	79	Зеленый	ТП-144	Розовый	144	»
ТП-79	Светло-голубой	79	Синий	ТП-148	»	248	Светло-коричневый
ТП-86	Светло-коричневый	86	Красный	ТП-155	Желтый	155	Оранжевый
ТП-90	Светло-голубой	90	Синий	ТП-167	Белый	167	Зеленый
ТП-95	Светло-зеленый	95	Зеленый	ТП-172	Розовый	172	Красный
ТП-97	Розовый	97	Красный	ТП-179	»	179	»
ТП-98	Белый	98	Зеленый	ТП-182	Светло-зеленый	182	Зеленый
ТП-107	»	107	Черный	ТП-193	Светло-розовый	193	Оранжевый
ТП-107	Светло-зеленый	107	Зеленый	ТП-213	Белый	213	Желтый
ТП-109	Белый	109	Бесцветный	ТП-223	Розовый	223	Красный
ТП-116	Светло-голубой	116	Зеленый	ТП-254	Белый	254	Бесцветный

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бродский А. Д. Новые методы измерения низких температур. М., Стандартгиз, 1962.
2. Положение о международной практической температурной шкале. Труды ВНИИМ. М., Стандартгиз, 1962, вып. 63 (123), с. 151.
3. Скотт Р. Б. Техника низких температур. Пер. с англ. Под ред. М. П. Малкова. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
4. Методы измерения температур. Сб. статей. Под ред. В. А. Соколова. Ч. 1, 2. М., Изд-во иностр. лит., 1954.
5. Гордов А. Н. Температурные шкалы. М., Стандартгиз, 1966.
6. Smithsonian physical tables. 9-th ed., Washington, 1954.
7. Боровик-Романов А. С., Олов М. П., Стрелков П. Г. Установление шкалы низких температур меж-

- ду 90, 19°K и 10°K. М., Изд-во Главной палаты мер и измерительных приборов, 1954.
8. Температура и ее измерение. Сб. докладов. Под ред. А. Арманды и К. Вульфсона. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
9. Sherman R. H., Sydoriak S. G., Roberts T. R. J. Res. Nat. Bur. Stand., 1964, v. 68A, p. 579.
10. Comité International des Poids et Mesures. — Metrologia, 1969, v. 5, p. 35.
11. Тепловые измерения. ГОСТ 12442—66. М., Стандартгиз, 1966.
12. Kostovski H. J. Metrologia, 1967, v. 3, p. 29.
13. Геращенко О. А., Федоров В. Г. Тепловые и температурные измерения. Справочное руководство. Киев, «Наукова думка», 1965.
14. Методы измерения температур в промышленности. М., Металлургиздат, 1952. (Авт.: Гордов А. Н., Аржаинов А. С., Билык В. Я. и др.)

15. Попов М. М. Термометрии и калориметрия. Изд. 2-е. М., Изд-во МГУ, 1954.
16. Справочник химика. Под ред. Б. П. Никольского. Изд. 2-е. Т. 1. М.—Л., Госхимиздат, 1962.
17. Термометры сопротивления. ГОСТ 6651—59. М., Стандартгиз, 1963.
18. Стрелков П. Г., Шаревская Д. И. «Измерительная техника», 1957, № 6, с. 53.
19. Термопары. ГОСТ 3044—61. М., Стандартгиз, 1961.
20. Самсонов Г. В., Кислый П. С. Высокотемпературные неметаллические термопары и наконечники. Киев, «Наукова думка», 1965.
21. Лах В. И., Стадник Б. И. «Приборы и средства автоматизации», 1961, № 8, с. 18.
22. Кей Дж., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. Пер. с англ. Под ред. К. П. Яковлева. М., Физматгиз, 1962.
23. Данишевский С. К., Ипатова С. И., Павлова Е. И., Смирнова Н. И. «Заводская лаборатория», 1963, т. 29, № 9, с. 1139.
24. Гуревич А. М., Каганов В. Ю., Полунин С. Ф., Ширяев В. В. «Заводская лаборатория», 1954, т. 20, № 1, с. 51.
25. Мендельсон К. Физика низких температур. Пер. с англ. Под ред. Н. Е. Алексеевского. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
26. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения. М.—Л. Госэнергоиздат, 1963. (Авт.: Малков М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г., Фрадков А. Б.).
27. Уайт Г. К. Экспериментальная техника в физике низких температур. Справочное руководство. Пер. с англ. Под ред. А. И. Шальникова. М., Физматгиз, 1961.
28. Эберт Г. Краткий справочник по физике. Пер. с нем. Под ред. К. П. Яковлева. М., Физматгиз, 1963.
29. Абрамович Б. Г. Термоиндикаторы и их применения. М., «Энергия», 1972.

ГЛАВА 2

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСШИРЕНИЯ И ЭФФЕКТ ДЖОУЛЯ—ТОМСОНА

Тепловым расширением называется эффект изменения размеров тела с изменением температуры при постоянном давлении. Тепловое расширение обусловлено асимметрией кривой потенциальной энергии межатомного взаимодействия относительно равновесного положения, вследствие чего при изменении температур происходит изменение среднего межатомного расстояния. Оно определяется химическим составом, структурой тела, а также давлением, температурой и другими термодинамическими параметрами.

В качестве количественной характеристики теплового расширения обычно используют:

истинный температурный коэффициент линейного расширения

$$\alpha = \frac{1}{L} \left(\frac{\partial L}{\partial T} \right)_P;$$

средний температурный коэффициент линейного расширения

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{L} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta T};$$

истинный температурный коэффициент объемного расширения

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P;$$

средний температурный коэффициент объемного расширения

$$\bar{\beta} = \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta T},$$

где L — длина; V — объем; T — температура тела. Размерность всех температурных коэффициентов град^{-1} .

9.1. ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ АНИЗОТРОПНЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Тепловое расширение анизотропного твердого тела (кристалла) может быть описано симметричным тензором второго порядка (тензором теплового расширения), компонентами которого являются температурные коэффициенты линейного расширения в определенных направлениях. Если структура тела известна, то для задания тензора достаточно указать три главных температурных коэффициента расширения α_1 , α_2 , α_3 соответственно вдоль главной оси симметрии кристалла, перпендикулярно к главной оси в плоскости осей симметрии и в направлении, перпендикулярном к двум первым. В кристаллах одноосной симметрии $\alpha_2 = \alpha_3$, а направление, определяющее α_2 , перпендикулярно к главной оси симметрии и лежит в произвольной плоскости, проходящей через нее. Температурный коэффициент линейного расширения в произвольном направлении α_γ выражается через главные коэффициенты:

$$\alpha_\gamma = \alpha_1 \cos \gamma_1 + \alpha_2 \cos \gamma_2 + \alpha_3 \cos \gamma_3,$$

где γ_1 , γ_2 , γ_3 — углы между направлениями, соответствующими главным коэффициентам, и заданным направлением γ .

Температурный коэффициент объемного расширения

$$\beta \approx \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3.$$

Главные температурные коэффициенты линейного расширения анизотропных твердых тел (кристаллов).

Элементы и неорганические соединения

Приведены значения среднего температурного коэффициента линейного расширения в указанном интервале температур или значения истинного температурного коэффициента линейного расширения при данной температуре. Значения в скобках — первые два ($c=0$) или три коэффициента интерполяционной формулы:

$$\alpha = a \cdot 10^{-6} + b \cdot 10^{-8}t + c \cdot 10^{-11}t^2.$$

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	α_1 или $\bar{\alpha}_1$, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	α_2 или $\bar{\alpha}_2$, $10^{-8} \text{ град}^{-1}$	α_3 или $\bar{\alpha}_3$, $10^{-11} \text{ град}^{-1}$	Литература
AgI	40	-3,97	0,65	0,65	[1]
	20÷70	{-3,97 -4,27}	{0,65 1,38}	{0,65 1,38}	[2]
3Ag ₂ S·Sb ₂ S ₃	20÷70	{0,91 10,5}	{20,1 -2,31}	{20,1 -2,31}	[2]
Al ₂ O ₃	20÷50	6,66	5,0	5,0	[3]
	52÷677	{6,58 0,50 0,26}	{5,42 0,55 0,29}	{5,42 0,55 0,29}	[2]
	20÷1000	9,03	—	—	[3]
As	30÷75	3,2—6,8	—	—	[4]
BaSO ₄	44÷360	{13,62 1,30 1,19}	{23,95 1,96 1,37}	{14,07 1,52 1,10}	[2]
Be	—150	1,6	2,8	2,8	[4, 5]
	10	8,6	11,7	11,7	[5]
	18÷220	10,4	15,0	15,0	[4, 5]
	18÷455	13,1	15,7	15,7	[4, 5]
	20÷600	16,0	—	—	[4]
Bi	—140	15,9	10,5	10,5	[1, 4, 6]
	30	16,2	11,6	11,6	[1, 4]
	10÷90	—	10,84	10,84	[6]
	20÷240	16,5	12,0	12,0	[4]
Bi ₂ Te ₃	20	22,2	12,9	12,9	[3]
C (графит)	0÷400	—	-1,5	-1,5	[2]
	0÷500	17,2	1,3	1,3	[2]
	0÷800	28,3	—	—	[2]
	500÷1000	20,4	2,2	2,2	[2]
	1000÷1500	24,4	2,6	2,6	[2]
	1500÷2300	27,7	3,2	3,2	[2]
Ca(OH) ₂	20÷100	33,4	9,8	9,8	[2]
CaWO ₄	—196÷25	7,9	12,7	12,7	[3]
	25÷500	11,2	18,7	18,7	[3]
	500÷850	13,8	22,0	22,0	[3]
	850÷1025	16,8	27,2	27,2	[3]
Cd	—200	48,2	18,5	18,5	[3]
	—160	59,0	19,2	19,2	[4]
	0	52,0	20	20	[1]
	60	52,25	21,8	21,8	[7]
	100	50,4	18,9	18,9	[7]
CdS	50÷500	3,5	5,0	5,0	[3]
Co	33÷100	16,1	12,6	12,6	[4]
CuS	20	29,27	41,58	4,55	[2]
FeCO ₃	20÷70	{19,2 2,55}	{6,05 91,7}	{6,05 91,7}	[2]
Fe ₂ O ₃	46÷400	{7,9 0,53 7,32}	{7,83 1,05 1,17}	{7,83 1,05 1,17}	[2]
Fe ₃ S ₈	20÷70	{2,35 8,64}	{31,2 -1,65}	{31,2 -1,65}	[2]
H ₃ BO ₃	30÷80	-3,68	10,83	255,9	[2]
Hg	—120	49,6	37,5	37,5	[4]
	—188÷—79	47,0	37,5	37,5	[4]
	—190÷—160	42,6	37,4	37,4	[4]
HgS	20÷70	{21,5 1,50}	{17,9 0,63}	{17,9 0,63}	[2]

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	α_1 или $\bar{\alpha}_1$, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	α_2 или $\bar{\alpha}_2$, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	α_3 или $\bar{\alpha}_3$, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	Литература
I	18	133,4	95,0	35,1	[2]
In	—17÷9	56	13	13	[4]
	23÷87	45	17	17	[4]
	100	28,4	18,6	18,6	[8]
	200	38,0	5,6	5,6	[8]
	300	54,0	—16,1	—16,1	[8]
KCl	30÷90	134,2	39	29,7	[2]
	90÷150	126,6	33,8	29,2	[2]
	150÷200	149,8	36,8	29,6	[2]
KNO ₃	30÷90	22,0	23,5	182,6	[2]
K ₂ SO ₄	0÷96	{36,14}	{32,25}	{36,34}	[2]
		{1,44}	{1,41}	{4,13}	
KH ₂ PO ₄	—150÷20	34,3	21,6	21,6	[3]
Mg	20÷100	26,4	25,6	25,6	[4]
	20÷200	27,7	26,6	26,6	[4]
MgCO ₃	20÷70	{21,3}	{5,99}	{5,99}	[2]
		{3,39}	{2,43}	{2,43}	
MgF ₂	0÷500	8,8	13,1	13,1	[3]
Mg(OH) ₂	20÷100	44,7	11,0	11,0	[2]
NaNO ₃	18÷200	{75,3}	{8,8}	{8,8}	[2]
		{51,0}	{5,4}	{5,4}	
	50	12,0	11,0	11,0	[3]
	100	13,2	12,0	12,0	[3]
	150	14,2	11,0	11,0	[2]
	200	18,4	10,5	10,5	[2]
	250	36,8	10,0	10,0	[2]
	295	66,0	10,0	10,0	[2]
(NH ₄) ₂ HPO ₄	24÷134	1,9	39,3	39,3	[3]
Os	50	5,8	4,0	4,0	[4]
	250	6,6	4,6	4,6	[4]
	500	8,3	5,8	5,8	[4]
RbSO ₄	0÷96	{33,85}	{31,95}	{35,90}	[2]
		{2,14}	{1,82}	{9,14}	
Re	20÷1917	12,4	4,7	4,7	[9]
Ru	50	8,8	5,9	5,9	[4]
	250	9,8	6,4	6,4	[4]
	500	11,7	7,6	7,6	[4]
SiO ₂ (кварц)	—100÷37	{7,07}	—	—	[2]
		{2,11}			
	0÷100	8,0	14,4	14,4	[2]
	0÷300	9,6	16,9	16,9	[4]
	10÷334	—	{13,25}	{13,25}	[3]
			{5,52}	{5,52}	
	0÷360	{7,07}	—	—	[3]
		{1,67}			
	360÷450	{25,8}	—	—	[3]
		{—10,81}			
		{20,16}			
SiC	0÷500	12,2	20,9	20,9	[4]
	200	3,26	—	—	[3]
	400	4,05	—	—	[3]
	600	4,29	—	—	[3]
	800	4,52	—	—	[3]
	1000	4,78	—	—	[3]
	1200	5,0	—	—	[3]
	1400	5,20	—	—	[3]
	1500	5,28	—	—	[3]
Sb	—215÷20	16	7,0	7,0	[4, 10]
	20	15,56	7,96	7,96	[1, 10]
	0÷100	16,8	8,28	8,28	[1, 10]
	20÷400	—	8,1	8,1	[1]
	100÷300	—	10,0	10,0	[10]
Se	20÷55	—17,9	74,1	74,1	[4]

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	α_1 или $\bar{\alpha}_1$, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	α_2 или $\bar{\alpha}_2$, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	α_3 или $\bar{\alpha}_3$, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	Литература
Sn	-195÷20	25,9	14,1	14,1	[1]
	20	30,5	15,45	15,45	[4]
	34÷194	45,8	25,7	25,7	[1]
SnO ₂	20÷70	{3,19}	{3,2}	{3,2}	[2]
		{1,20}	{0,76}	{0,76}	
Te	20÷60	-1,7	27,0	27,0	[3, 4]
TiO ₂	20÷70	{9,19}	{7,14}	{7,14}	[2, 3]
		{2,25}	{1,10}	{1,10}	
(TiO) ₂ /	18	14,5	19,3	22,05	[2]
Tl	32÷91	72	9,0	9,0	[4]
U	0÷100	21,7	-1,5	23,2	[11]
	-190÷18	49,5	11,3	11,3	[1, 4]
	0	60	12,6	12,6	[4]
	0÷250	56	15,6	15,6	[1, 4]
	20÷100	64,0	14,1	14,1	[1, 4]
	20÷400	59	16	16	[1, 4]
ZnO	20÷70	{3,9}	{3,2}	{3,2}	[2, 3]
		{1,20}	{0,76}	{0,76}	
Zr	0÷100	4,0	13,0	13,0	[4]

Таблица 9.2

Главные температурные коэффициенты линейного расширения анизотропных твердых тел (кристаллов).
 Минералы и органические соединения
 Пояснения те же, что и к табл. 9.1.

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	α_1 или $\bar{\alpha}_1$, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	α_2 или $\bar{\alpha}_2$, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	α_3 или $\bar{\alpha}_3$, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	Литература
Антрацен	-190÷20	3,06	25,0	0,73	[2]
Арагонит	-150÷0	{ 9,87}	{ 15,88}	{ 32,4}	[2]
		{ -0,84}	{ 0,82}	{ 0,73}	
		{ -11,3}	{ -23,05}	{ -40,7}	
	20÷70	{10,16}	{17,19}	{34,60}	[2]
		{ 0,64}	{ 3,68}	{ 3,37}	
Аугит	40	7,91	13,86	2,72	[2]
Берилл	20÷70	{-1,35}	{1,00}	{1,00}	[2]
		{ 0,41}	{0,46}	{0,46}	
Брукит	17,5	14,5	19,2	22,05	[1]
Вулканит	20÷70	{7,40}	{8,39}	{8,39}	[2]
		{1,74}	{1,67}	{1,67}	
Гидрогиллит	20÷100	38,4	10,9	-5,6	[2]
Гипс	40	20,81	41,63	1,57	[2]
Доломит	20÷70	{20,6}	{4,15}	{4,15}	[2]
		{ 3,68}	{1,93}	{1,93}	

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	α_1 или $\bar{\alpha}_1$, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	α_2 или $\bar{\alpha}_2$, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	α_3 или $\bar{\alpha}_3$, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	Литература
Изумруд	0,85	—1,35	1,0	1,0	[10]
Исландский шпат	0÷80	26,31	5,44	5,44	[12]
Кальцит	—150÷0	$\begin{Bmatrix} 24,39 \\ 0,53 \\ -30,7 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} -5,68 \\ 0,03 \\ -4,58 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} -5,68 \\ 0,03 \\ -4,58 \end{Bmatrix}$	[3]
	50	26,6	—5,2	—5,2	[10]
	75÷400	$\begin{Bmatrix} 24,71 \\ 3,78 \\ -3,63 \end{Bmatrix}$	—	—	[2]
	365	—	—3,8	—3,8	[10]
Кризоберилл	20÷70	$\begin{Bmatrix} 5,16 \\ 1,22 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 6,01 \\ 1,01 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 6,02 \\ 2,20 \end{Bmatrix}$	[2]
Нафталин	—195÷20	212,8	40,3	6,15	[2]
Нитроанилин	—183÷20	150,3	7,5	24	[2]
Пираргирит	40	0,91	20,1	20,1	[1]
Пирротин	40	2,35	31,2	31,2	[1]
Рутил (анатаз)	40	8,19	4,68	4,68	[1]
Слюда (мусковит)	50	8,1	7,5	7,5	[2]
	0÷100	8,5	—	—	[2]
	20÷300	—	8,25	8,25	[4]
Слюда (флогопит)	0÷100	—	13,5	13,5	[2]
Топаз	40	4,44	4,84	5,92	[1]
	20÷70	$\begin{Bmatrix} 4,14 \\ 1,68 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 4,84 \\ 1,53 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 5,92 \\ 1,83 \end{Bmatrix}$	[2]
Турмалин	20÷70	$\begin{Bmatrix} 9,05 \\ 3,20 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 3,79 \\ 1,83 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 3,79 \\ 1,83 \end{Bmatrix}$	[2]
	6÷320	$\begin{Bmatrix} 8,62 \\ 0,56 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 3,58 \\ 0,54 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 3,58 \\ 0,54 \end{Bmatrix}$	[2]
	0÷100	9,37	3,73	3,73	[10]
Фенацит	20÷70	$\begin{Bmatrix} 3,79 \\ 2,13 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 2,99 \\ 2,30 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 2,99 \\ 2,30 \end{Bmatrix}$	[2]
Шпинель	100÷700	5,9	5,9	5,9	[13]
Циркон	20÷70	$\begin{Bmatrix} 44,3 \\ 1,41 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 23,3 \\ 1,91 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 23,3 \\ 1,91 \end{Bmatrix}$	[2]

9.2. ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ИЗОТРОПНЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Тепловое расширение изотропного твердого тела характеризуется температурным коэффициентом линейного расширения α (истинным или средним). Температурный коэффициент объемного расширения $\beta \approx 3\alpha$. С погрешностью $\pm 10\%$ температурный коэффициент линейного расширения можно вычислить по формуле Грюнайзена:

$$\alpha = k \frac{\gamma C_V}{V},$$

где C_V — теплоемкость при постоянном объеме; $\gamma = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$ — коэффициент изотермического сжатия; k — постоянная Грюнайзена.

Если известны параметры потенциала межатомного взаимодействия (m, n) Леннарда—Джонса, то $k = (m \div n \div 3)/6$.

При температурах, близких к температуре плавления, часто выполняется эмпирическое соотношение $\alpha \cdot T = 69,6$ ($T, ^\circ\text{K}$).

Температурные коэффициенты линейного расширения
изотропных твердых тел (кристаллов)
Пояснения те же, что и к табл. 9.1.

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	α или $\bar{\alpha}$, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	Литература
Ag	—250÷0 —191÷16 —183 —103 20 100 300 500 700 900 1000	14,9 17,0 13,27 16,59 19,0 19,45 20,50 21,58 23,99 26,50 27,85	[4] [4] [8] [8] [7] [8] [8] [8] [8] [8] [8]
AgBr	20	34,3	[2]
AgCl	—110÷10	$\begin{cases} 28,62 \\ 1,86 \\ -28,2 \end{cases}$	[2]
	25 200 400 425	30,01 34,59 63,19 69,99	[3] [3] [3] [3]
Al	—250÷—160 —190÷0 —100÷20 0 100 200 300 400 500 600	9,1 18,0 19,5 22,58 23,57 24,55 25,54 26,53 27,52 28,50	[8] [4] [6] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1]
	—200÷0	$\begin{cases} 22,65 \\ 33,5 \\ -10,9 \end{cases}$	[1]
	—100÷600	$\begin{cases} 22,6 \\ 17,6 \end{cases}$	[1]
AlN	25÷200	4,03	[15]
Al ₂ O ₃	20÷1000	8,4	[1]
As	0	5,0	[6]
As ₂ O ₃	20÷1000	8,4	[1]
Au	—183 —103	10,94 12,93	[8] [8]
	—100÷500	$\begin{cases} 14,13 \\ 5,7 \\ -0,27 \end{cases}$	[1]
	20 100 300 500 700 900 1100	14,0 14,43 15,34 15,88 17,18 18,24 20,15	[8] [8] [8] [8] [8] [8] [8]
B	20 0÷100 220÷750	2,0 8,0 8,3	[9] [9] [9]
B ₄ C	0÷100 24÷500	4,5 4,68	[15] [16]
BN	25÷1000	7,51	[15]
Ba	0	19,0	[8]
	0÷300	19,45	[4]
BaB ₆	20÷800	6,8	[15]

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	α или $\bar{\alpha}$, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	Литература
BaF ₂	0÷300	18,4	[3]
Ba(NO ₃) ₂	—273÷—195 —195÷—78 —78÷15	3,3 6,7 17,0	[3] [3] [3]
	75÷250	$\begin{cases} 15,8 \\ 3,7 \end{cases}$	[3]
BaTiO ₃	30÷120 120 200 400 600 800 1050	5,1 8,6 9,4 11,3 13,2 15,1 17,5	[2] [3] [3] [3] [3] [3] [3]
BaSi ₂	20÷1100	8,4	[15]
Be	—120÷—100 —100÷—50 —120÷0 —50÷0 0	5,0 7,0 8,1 9,2 10,5	[9] [9] [4] [9] [6]
	20÷200 20÷300 20÷400 20÷500	12,8 13,7 14,5 15,2	[6] [6] [6] [6]
	0÷600	$\begin{cases} 10,5 \\ 25,2 \end{cases}$	[17]
	20÷600 20÷700 25÷1000	15,7 16,8 18,77	[6] [4] [9]
Be ₂ C	1200 25÷50 0÷200 0÷400 0÷600	23,7 5,6 7,7 9,5 10,5	[4] [5] [5] [5] [5]
BeO	25÷1700	10,6	[1]
Bi	—183÷15 0	12,98 13,37	[1] [6]
	0÷270 20÷100	14,6 13,45	[1] [1]
C (алмаз)	—220÷40 —184÷—79 —79÷0 0÷78 0÷400	0,6 0,18 0,58 1,2 2,8	[8] [3] [2] [4] [4]
	0÷555	$\begin{cases} 0,87 \\ 0,92 \\ -0,67 \end{cases}$	[2]
	0÷750 40÷280 280÷830 830÷1530	4,5 2,2 3,73 5,67	[4] [8] [8] [8]
Графит, $\rho=1,86 \text{ г/см}^3$	0 250 500 750 1000 1250	7,0 8,1 8,8 9,4 10,0 10,8	[5] [5] [5] [5] [5] [5]
	400÷1700	11,0	[1]
Ca	—220÷40 —150 —50 30 20÷100 0÷300	18,5 18,0 20,9 22,5 25,2 22,0	[8] [4] [4] [4] [4] [4]

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	α или $\bar{\alpha}$, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	Литература
CaCl_2	20÷190	22,3	[2]
CaF_2	—179	7,1	[1]
	—117	14,6	[1]
	—10	18,5	[1]
	—192÷17	$\left\{ \begin{array}{l} 18,38 \\ 2,511 \\ -21,1 \end{array} \right\}$	[3]
	43÷637	$\left\{ \begin{array}{l} 18,51 \\ 1,48 \\ 21,52 \end{array} \right\}$	[2]
CaO	0÷1400	13,8	[1]
Cd	—220	20,6	[4]
	—160	27,4	[4]
	—50	28,3	[8]
	0	29,0	[8]
	100	30,4	[8]
	200	31,8	[8]
	300	32,5	[8]
	0÷200	$\left\{ \begin{array}{l} 29,0 \\ 55,0 \end{array} \right\}$	[18]
CdB_6	20÷800	8,7	[15]
CdF_2	20÷120	27,0	[3]
CdI_2	40	29,1	[1]
CdTe	50	4,5	[3]
Ce	27÷775	7,1	[8]
CeB_6	20÷800	7,3	[15]
Co	0	12,0	[6]
	100	13,1	[5]
	200	14,2	[7]
	300	14,5	[5]
	400	15,7	[5]
	500	16,0	[5]
	0÷500	$\left\{ \begin{array}{l} 12,0 \\ 11,24 \\ -0,93 \end{array} \right\}$	[17]
	600	16,0	[5]
	700	16,4	[5]
	900	16,9	[5]
CoSi	20÷800	10,6	[15]
Cr	—200÷0	4,1	[4]
	—100÷0	5,1	[4]
	0	5,88	[6]
	0÷700	$\left\{ \begin{array}{l} 5,9 \\ 15,48 \\ -1,02 \end{array} \right\}$	[6]
	0÷200	7,78	[6]
	0÷400	8,4	[6]
	0÷600	9,22	[6]
	0÷900	11,0	[6]
	730÷1100	14,9	[8]
	1100÷1490	19,4	[8]
Cr_4B	20÷1100	8,2	[15]
CrB	20÷1100	9,5	[15]
CrB_2	20÷1100	11,1	[15]
Cr_7C_3	20÷1100	9,4	[15]
Cr_3C_2	20÷1100	11,7	[15]
CrN	20÷800	2,3	[15]
	850÷1040	7,5	[15]
Cr_2N	20÷1100	9,45	[15]
Cs	0	97,0	[6]
CsBr	0	46,6	[3]
	—139÷300	$\left\{ \begin{array}{l} 46,6 \\ 4,67 \\ -1,78 \end{array} \right\}$	[3]

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	α или $\bar{\alpha}$, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	Литература
CsCl	20÷469	$\left\{ \begin{array}{l} 45 \\ 4,84 \end{array} \right\}$	[3]
CsI	30	48,6	[2]
Cu	—272÷—190	1,4	[8]
	—183	9,38	[8]
	—117	14,06	[8]
	—100÷400	$\left\{ \begin{array}{l} 16,2 \\ 19,0 \\ -6,0 \end{array} \right\}$	[1]
	0÷1000	$\left\{ \begin{array}{l} 16,7 \\ 7,2 \end{array} \right\}$	[18]
	20	16,61	[8]
	100	17,18	[8]
	300	18,45	[8]
	500	19,15	[8]
	700	20,72	[8]
	900	22,50	[8]
	1100	24,10	[8]
CuB_6	20÷800	6,5	[15]
CuBr	20÷150	19	[19]
CuCl	40÷140	10	[3]
CuI	20÷150	22	[2]
Cu_2O	20÷70	$\left\{ \begin{array}{l} 0,93 \\ 2,10 \end{array} \right\}$	[2]
Dy	—100÷1000	11,8	[8]
Er	—170÷950	12,0	[8]
Eu	—200÷780	26	[8]
Fe	—200÷20	9,18	[1]
	—100÷0	10,4	[4]
	0	11,3	[6]
	0÷100	12,1	[1]
	0÷300	13,2	[1]
	0÷500	14,2	[1]
	0÷700	15,0	[1]
	0÷800	$\left\{ \begin{array}{l} 11,3 \\ 17,6 \\ -1,68 \end{array} \right\}$	[6]
Fe_3N	25	7,9	[15]
FeS_2	—10	8,43	[1]
	—160÷0	$\left\{ \begin{array}{l} 8,50 \\ 1,46 \\ -12,0 \end{array} \right\}$	[2]
	45÷350	$\left\{ \begin{array}{l} 8,40 \\ 1,12 \\ 0,92 \end{array} \right\}$	[2]
Ga	20	18,1	[2]
GaAs	—233	—0,50	[3]
	—218	0,00	[3]
	—195÷17	3,64	[3]
	18÷287	5,74	[3]
	287÷407	7,44	[3]
GaP	—	5,3	[13]
GaSb	—	6,9	[13]
Gd	30÷950	9,7	[8]
Ge	—243	—0,4	[3]
	—225	0,00	[3]
	—203	0,67	[3]
	—173	2,20	[3]
	—113	4,29	[3]
	—53	5,03	[3]
	—3	5,50	[3]
	27	5,75	[3]
	0÷250	5,8	[8]

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	α или $\bar{\alpha},$ $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	Литература
Ge	230	6,0	[9]
	450	7,3	[9]
	840	7,5	[9]
CeO ₂	100÷500	8,6	[1]
H ₂ O	—250	—6,1	[4]
(лед)	—210	—1,3	[6]
	—200	0,8	[6]
	—190	3,3	[6]
	—150	16,8	[6]
	—100	33,9	[6]
	—80	39,2	[6]
	—50	45,6	[6]
	—20	50,5	[6]
	0	52,7	[6]
Hf	—200÷0	—1,14	[20]
	—100÷0	—0,53	[20]
	0÷200	1,15	[20]
	0÷400	2,40	[20]
	0÷650	3,61	[20]
	0÷850	5,02	[20]
	0÷975	5,74	[20]
HfB ₂	20÷1000	5,73	[15]
HfC	25÷600	6,59	[15]
HfN	20÷1100	6,9	[15]
Hg	—183÷—39	30	[10]
	—78÷—39	41	[10]
Ho	400	9,5	[8]
In	—180÷20	26,7	[4]
	10÷90	{ 24,75 } 423,8	[1]
	20÷100	30,5	[4]
InAs	—195÷17	3,40	[3]
	17÷300	5,20	[13]
	300÷400	7,04	[3]
InSb	—263	—0,06	[3]
	—243	—1,72	[3]
	—223	—0,33	[3]
	—203	—0,89	[3]
	—173	2,76	[3]
	—83	4,35	[3]
	—23	4,78	[3]
	7	4,95	[3]
	27	5,04	[3]
Ir	—183÷20	5,71	[10]
	—150÷—50	5,64	[1]
	—150÷800	{ 6,41 } 6,39 —1,30	[1]
	0	6,5	[6]
	200	6,8	[8]
	400	7,11	[8]
	600	7,42	[8]
	800	7,72	[8]
	1000	9,02	[1]
	1250	9,60	[1]
	1500	10,18	[1]
	1750	10,76	[1]
I	—190÷17	83,7	[10]
	0	93,0	[6]
K	0	84	[7]
	0÷56	{ 79,7 } 139,4	[1]
KBr	—160÷300	{ 37,6 } 4,1	[2]

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	α или $\bar{\alpha},$ $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	Литература
KBr	0÷79	37	[19]
	45÷680	{ 37,99 } 4,1	[2]
KCl	—100÷300	{ 36,0 } 3,9	[2]
	0	36	[2]
	0÷600	{ 34,6 } 3,5	[2]
	50	37,4	[3]
	200	41,2	[3]
	400	48,0	[3]
	600	54,7	[3]
	745	59,7	[3]
KF	—79÷0	45,0	[2]
	0÷79	33,3	[19]
KI	20÷100	40,6	[2]
La	—173÷310	5,2	[8]
	310÷775	9,6	[8]
La ₂ Si ₃	20÷1100	8,7	[15]
Li	—178	17,0	[4]
	—98	36,3	[4]
	—3	45,7	[4]
	20	56,0	[9]
	0÷100	60	[8]
LiBr	—184÷—79	39,3	[2]
	—79÷0	46,6	[2]
	0÷79	46,6	[19]
	0÷79	40,6	[19]
LiCl	—150÷0	{ 31,95 } 5,05	[19]
LiF	—150÷0	{ 31,95 } —4,07	[19]
	0÷79	30,6	[19]
	47÷794	{ 33,17 } 3,08	[2]
		{ 2,40 }	
LiI	—184÷—79	47	[2]
	—79÷0	55,7	[2]
	0÷79	56	[19]
	400	12,5	[8]
Lu	—190÷20	21,3	[4]
Mg	—100÷0	23,4	[1]
	0	25,07	[6]
	20÷100	25,9	[4]
	20÷300	28,0	[4]
	0÷600	31,71	[6]
	—150÷500	{ 25,0 } 30,0 —3,48	[1]
MgF ₂	25÷100	10,7	[3]
(иртран-1)	25÷200	11,0	[3]
	25÷300	11,5	[3]
	25÷400	11,9	[3]
(иртран-51)	20÷500	11,5	[3]
MgO	20÷1700	15,6	[3]
	27	11,2	[3]
	50÷715	{ 10,89 } 0,59	[2]
		{ 0,10 }	
Mn	—200÷0	20,4	[6]
	0	22,6	[6]

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	α или $\bar{\alpha}$ $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	Литература
Mn	0÷200 0÷400 0÷600 0÷800	22,2 23 24 26	[6] [6] [6] [6]
α -Mn	-190÷0 10 0÷300	15,9 22,3 25,2	[4] [4] [4]
β -Mn	-183÷0	12,8÷20,4	[4]
γ -Mn	-70÷0 10	13,6 14,8	[4] [4]
MnS	20÷70	15,2	[2]
MnS ₂	20÷70	11,1	[2]
Mo	-190÷0 -100÷0 0÷100 0÷300 0÷500 0÷800 0÷1600 30÷2330	4,2 4,8 5,19 5,39 5,59 5,87 6,65 7,2	[4] [4] [6] [6] [6] [6] [6] [1]
	0÷2100	{5,1} {1,93}	[17]
Mo ₂ C	12÷190	7,8	[15]
Mo ₂ N	20÷1100	6,2	[15]
MoSi	20÷800	16,3	[15]
MoSi ₂	20÷1480	5,1	[15]
Na	-193÷0 0÷17 0÷95	59,8 68,2 72	[4] [4] [8]
NaBr	-184÷-79 -79÷0 15÷60	31,0 36,7 42,52	[2] [2] [2]
	36÷285	{38,65} {2,24} {8,20}	[2]
NaCl	-153÷27 0 0÷300	{38,95} {2,98} {-25,5} 39 {39,2} {3,9}	[2] [3] [2]
NaF	-184÷-79 -79÷0 30 195 400 625 30÷250	23 33 32,2 35,9 40,6 45,5 {33,13} {2,95}	[2] [2] [3] [3] [3] [3] [3]
Na ₂ WO ₄	20÷600	{17,68} {2,77}	[2]
Nb	-212÷0 -100÷0 -100÷400 0 0÷100 0÷400 20÷1500 20÷1100	5,8 6,9 {7,06} {2,88} 7,06 7,2 7,64 10,0 7,9	[4] [4] [17] [6] [4] [6] [4] [15]
NbB ₂	20÷1100	3,26	[15]
Nb ₂ N	0÷270	10,1	[15]

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	α или $\bar{\alpha}$ $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	Литература
Nb ₂ C	12÷190 20÷1100	7,0 6,5	[15] [15]
Nd	-173÷850 100÷260	8,6 0,4	[4] [4]
NdB ₆	20÷800	7,3	[15]
NH ₄ Br	31÷122	{55,53} {12,16} {185,2}	[2]
NH ₄ Cl	40 31÷128	62,55 {49,16} {21,22} {137,2}	[1] [2]
Ni	-273÷-130 -253÷10 -200÷350 -192÷16 -100÷0 0 0÷200 0÷400 25÷600 0÷800 30÷1000	5,8 8,1 {12,54} {17,5} {-2,25} 10,0 11,6 12,54 14,0 14,98 15,56 16,3 18,0	[8] [4] [1] [4] [1] [1] [6] [6] [4] [6] [7]
Os	0 50 10÷90	6,1 6,79 {6,95} {17,0}	[6] [6] [1]
P	0	125	[6]
Pa	17÷1115	11,2	[8]
Pb	-200÷150 -200 -100 -100÷300 0 100 300 20÷120 75÷180 25÷93 -200÷-100 -200÷100 -191÷16 -100÷0 16÷100 16÷500 16÷1000 -93÷30 -173÷800 20÷800 -191÷16 -150÷-50 -90÷0 0 0÷100 0÷300 0÷500 0÷800	{24,0} {3,99} 26,5 27,3 {28,3} {20} 28,3 29,2 31,3 31 31,6 7,9 9,75 {11,60} {8,3} {-2,62} 10,3 11,1 12,4 12,8 13,8 20,8 6,5 7,5 8,0 7,97 8,7 8,95 9,0 9,35 9,6 9,9	[1] [8] [8] [14] [6] [8] [8] [3] [2] [1] [1] [8] [4] [4] [4] [4] [8] [8] [15] [4] [1] [1] [4] [6] [4] [4] [4] [6]

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	α или $\bar{\alpha}$, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	Литература
Pt	0 ÷ 1070	10,35	[1]
	—150 ÷ 600	$\begin{Bmatrix} 8,79 \\ 6,23 \\ -1,56 \end{Bmatrix}$	[1]
	0 ÷ 1100	$\begin{Bmatrix} 8,95 \\ 2,44 \end{Bmatrix}$	[6]
Pu	—180 ÷ 100	$\begin{Bmatrix} 48,39 \\ 191,8 \end{Bmatrix}$	[1]
	—150 ÷ 100	42,4	[6]
	122 ÷ 206	$\begin{Bmatrix} 26,4 \\ 148,0 \end{Bmatrix}$	[5]
	130 ÷ 200	20,9	[1]
	200 ÷ 300	60,0	[8]
	320 ÷ 500	—15,4	[8]
	500 ÷ 540	—27,5	[8]
	540 ÷ 600	36,4	[8]
Rb	0 ÷ 30	90	[8]
RbBr	—184 ÷ —79	32,3	[8]
	—79 ÷ 0	34,7	[2]
RbCl	—184 ÷ —79	30,5	[2]
	—79 ÷ 0	32,8	[2]
RbI	—184 ÷ —79	37,3	[2]
	—79 ÷ 0	39,7	[2]
Re	0 ÷ 1000	6,7	[8]
Rh	—273 ÷ —90	4,4	[8]
	—174	5,0	[4]
	—92	7,4	[4]
	—28	7,9	[4]
	—180 ÷ 100	$\begin{Bmatrix} 8,19 \\ 8,44 \\ -2,1 \end{Bmatrix}$	[1]
	0 ÷ 1500	$\begin{Bmatrix} 7,85 \\ 8,9 \\ -0,33 \end{Bmatrix}$	[18]
	40	8,5	[1]
	0 ÷ 200	8,71	[6]
	0 ÷ 500	9,7	[4]
	0 ÷ 1000	10,8	[4]
	0 ÷ 1500	12,1	[4]
Ru	50	9,91	[8]
S (ромбическая)	0	74,0	[6]
S (моноклинная)	0	80	[6]
Sb	—190 ÷ 17	10,22	[1]
	0	9,2	[6]
	200	9,6	[6]
	400	10,0	[6]
	600	10,3	[6]
	0 ÷ 600	$\begin{Bmatrix} 9,2 \\ 3,8 \end{Bmatrix}$	[14]
Sb ₂ O ₃	40	19,63	[1]
Sc	400	11,4	[8]
ScB ₆	20 ÷ 800	6,8 ÷ 7,6	[15]
Se (аморфный)	—78 ÷ 0	42,7	[4]
	0	43,9	[4]
Se (поликристаллический)	—160 ÷ 0	37,3	[4]
	—78 ÷ 19	20,3	[4]
	20	37,0	[9]
	20 ÷ 100	22,9	[4]
	205	45,2	[4]

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	α или $\bar{\alpha}$, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	Литература
Si	—233	—0,05	[3]
	—203	—0,59	[3]
	—191 ÷ 18	$\begin{Bmatrix} 2,5 \\ 15,4 \end{Bmatrix}$	[1]
	—173	—0,31	[3]
	—113	—0,65	[3]
	—83	1,28	[3]
	—3	2,27	[3]
	27	2,33	[3]
	20 ÷ 500	2,4	[4]
	25 ÷ 900	$\begin{Bmatrix} 3,002 \\ 0,154 \\ 0,203 \end{Bmatrix}$	[3]
	500	3,0	[4]
	1000	3,3	[4]
SiC	41 ÷ 605	4,3	[5]
	20 ÷ 1000	5,2	[5]
	41 ÷ 1205	4,7	[5]
	0 ÷ 1700	5,4	[5]
SmB ₆	20 ÷ 800	6,8	[15]
Sn	0	21	[6]
	0 ÷ 100	26,2	[6]
	0 ÷ 200	31,6	[6]
SnO ₄	40	3,2 ÷ 3,9	[1]
Sr	0 ÷ 230	20,6	[8]
	230 ÷ 500	22,2	[8]
	540 ÷ 650	20,0	[8]
Sr(NO ₃) ₂	75 ÷ 425	$\begin{Bmatrix} 31,6 \\ 0,8 \\ 4,0 \end{Bmatrix}$	[2]
Ta	—190 ÷ 20	6,2	[4]
	0 ÷ 400	$\begin{Bmatrix} 6,46 \\ 1,8 \end{Bmatrix}$	[4]
	20 ÷ 100	6,6	[4]
	20 ÷ 300	6,6	[4]
	20 ÷ 500	6,6	[4]
	20 ÷ 1400	7,3	[4]
	27 ÷ 2400	7,8	[4]
	1670 ÷ 2860	11,2	[4]
TaB ₂	20 ÷ 1100	8,3	[15]
TaC	20 ÷ 1100	8,29	[15]
TaN	20 ÷ 700	3,6	[15]
Ta ₃ N	20 ÷ 1000	5,2	[15]
TaSi ₂	20 ÷ 1000	8,85	[15]
Tb	20	11,8	[8]
Te	0 ÷ 100	17,0	[8]
	40	16,8	[4]
Th	—216 ÷ 20	9,8	[4]
	20 ÷ 100	11,3	[4]
	20 ÷ 300	13,1	[4]
	20 ÷ 600	13,7	[4]
	30 ÷ 1000	12,5	[5]
ThB ₆	20 ÷ 800	7,8	[15]
ThO ₂	25 ÷ 1700	10,2	[1]
Ti	—273 ÷ —120	2,5	[8]
	—195 ÷ 20	6,8	[4]
	0	7,7	[6]
	0 ÷ 700	$\begin{Bmatrix} 7,7 \\ 7,2 \end{Bmatrix}$	[14]
	20 ÷ 200	8,09	[9]
	20 ÷ 400	9,45	[4]
	20 ÷ 600	9,9	[4]
	20 ÷ 800	10,1	[4]

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	α или $\bar{\alpha}$, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	Литература
Ti	500÷600	11,39	[9]
	700÷800	10,05	[9]
	860÷960	10,5	[4]
TiB ₂	17÷400	5,5	[15]
TiB ₄	—20÷30	94,0	[2]
TiC	12÷270	7,74	[15]
	24÷605	7,24	[16]
TiI ₄	—30÷125	74	[2]
Ti	—216÷—195	26,17	[9]
	—195÷—183	27,61	[9]
	—183÷—160	28,38	[9]
	—160÷—140	29,19	[9]
	—120÷—100	30,13	[9]
	—80÷—60	31,09	[9]
	—40÷—20	32,37	[9]
	20	28	[9]
	0÷100	29,4	[4]
	0÷294	33	[1]
TiB ₂	25÷1300	8,1	[15]
TiBr	15÷60	51,20	[3]
TiCl	15÷60	54,57	[3]
TiH	40	45,0	[2]
Tu	400	11,6	[8]
U	—260÷150	10,7	[8]
	150÷650	19,2	[8]
	660÷770	10,9	[8]
	780÷1110	19,4	[8]
UB ₂	20÷1100	10,4	[15]
UC	20÷1100	7,5	[15]
UO ₂	25÷1000	10,52	[1]
V	—210÷50	6,15	[8]
	—183÷0	6,6	[4]
	20	7,8	[4]
	0÷100	8,3	[4]
	0÷500	9,6	[7]
	0÷1000	10,9	[5]
VB ₂	0÷1100	7,5	[15]
VC	17÷190	7,2	[15]
VN	20÷1100	8,11	[15]
W	—190÷0	3,8	[10]
	—100÷0	4,2	[4]
	—150÷502	{4,28} {0,58}	[1]
	0	4,3	[6]
	0÷2100	{4,3} {1,42}	[17]
	400	4,45	[1]
	1027	5,19	[10]

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	α или $\bar{\alpha}$, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$	Литература
W	1300	5,12	[1]
	1700	6,22	[1]
	2027	7,26	[10]
	2600	7,7	[8]
WC	22÷400	3,84	[15]
W ₂ C	17÷270	5,8	[15]
	0÷2400	7,3	[16]
Y	400	10,8	[8]
YB ₆	20÷800	6,2	[15]
YC	20÷1100	1,36	[15]
Yb	27÷700	29,9	[8]
YbB ₆	20÷800	5,8	[15]
Zn	—200÷0	22	[6]
	—100÷0	28	[6]
	—170÷60	{29,5} {43,2} {—12,0}	[1]
	—100÷400	{30 40}	[1]
	0	30	[6]
	0÷100	32	[6]
	0÷200	34	[6]
	0÷300	36	[6]
	0÷400	38	[6]
ZnCl	20÷150	29	[2]
ZnS (иэгран-2)	—150÷0	{6,16} {0,517} {—11,8}	[2]
	25÷100	6,6	[3]
	25÷200	6,9	[3]
	25÷300	7,2	[3]
	25÷400	7,5	[3]
Zr	—273÷320	5,9	[8]
	—183÷0	4÷5,1	[4]
	20	6,3	[9]
	20÷200	5,4	[4]
	20÷400	6,1	[4]
	20÷700	7,1	[4]
	900÷1320	9,5	[4]
ZrB ₂	20÷1100	6,88	[15]
ZrC	0÷100	6,3	[16]
	0÷400	8,2	[16]
	0÷700	9,5	[16]
	0÷1000	10,2	[16]
ZrN	20÷1100	7,24	[15]
ZrO ₂	0÷79	4,5	[19]

Средний температурный коэффициент линейного расширения специальных сплавов [4, 6, 8, 11]

Сплав (состав, вес. %)	Интервал температур, °C	$\alpha, 10^{-6} \text{ град}^{-1}$	Сплав (состав, вес. %)	Интервал температур, °C	$\alpha, 10^{-6} \text{ град}^{-1}$
Дельта-металл (60% Cu; 36% Zn; 2% Sn; 2% Fe)	20÷100	20	96,6% Al; 3,4% Ni	20÷100	21,8
Инвар (64% Fe; 36% Ni)	0÷100	0,01÷2,0	60% Al; 40% Si	20÷300	23,7
Кантал (68,5% Fe; 23,4% Cr; 6,2% Al; 1,9% Co; 0,06% C)	20÷100	11,6		20÷100	14,7
Ковар (Феррико) (54% Fe; 31% Ni; 15%Co)	20÷900	13,9÷15,1	69,5 % Al; 30,5% U	20÷300	17,1
Манганин (84—86% Cu; 12% Mn; 2—4% Ni)	20÷300	5,0		20÷100	19,4
	20÷100	18,1	97% Be; 3,0% Cu	20÷300	21,3
	0÷400	18,9		20÷600	22,1
	0÷800	21,1	56% Co; 35% Fe; 9% Cr	20÷100	15,9÷17,3
Монель (65—70% Ni; 25—30% Cu; 2%Fe; 1,5% Mn)	25÷100	14,0	52% Co; 37,5% Fe; 10,5% Cr	20÷300	16,4÷17,4
Стеллит (80%Co; 20% Cr)	25÷600	16,3	80,5% Cu; 19,5% Ni	20÷60	—1,1
	20÷100	14,1		—182÷0	13,0
	20÷300	15,2	97% Pb; 3% Sb	0÷40	14,7
	20÷600	16,1	80% Pt; 20% Ir	20÷100	28,3
95,8% Al; 4,2% Be	20÷100	22,4		—190÷0	7,5
	20÷500	26,6	80% Pt; 20% Rh	0÷100	8,3
66,8%Al; 33,2%Cu	20÷100	19,7		0÷1000	9,6
	20÷300	20,8		0÷500	9,6
				0÷1000	10,4
				0÷1400	11,0

Таблица 9.5

Средний температурный коэффициент линейного расширения $\alpha, 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, сталей в интервале от 20°C до указанной температуры

Марка	Температура, °C							Литература
	100	200	300	400	500	600	700	
Углеродистые стали:								
Ст08 кп	11,66	12,32	13,02	13,65	14,22	14,64	15,01	[21]
Ст15	12,18	12,34	13,12	13,49	14,27	14,30	—	[21]
Ст20	11,16	12,12	12,78	13,38	13,93	14,38	12,91	[21]
Ст25	12,18	12,66	13,08	13,47	13,92	14,41	14,88	[21]
Ст30	11,09	11,89	12,72	13,42	14,02	14,43	14,76	[21]
Ст40	11,21	12,14	13,0	13,58	14,05	14,58	14,85	[21]
Ст45	11,59	12,32	13,09	13,71	14,18	14,67	15,08	[21]
Ст50	12,0	12,4	12,9	13,3	13,9	14,1	14,3	[21]
Легированные стали:								
15X, 20X	11,3	11,6	12,5	13,2	13,7	—	—	[21]
30X	12,2	12,8	13,3	13,7	14,1	14,5	14,8	[6, 21]
15XФ, 20XФ	12,0	12,5	13,2	13,6	14,1	14,5	14,8	[6, 21]
25XФ	11,9	12,4	13,1	13,7	14,2	14,5	14,9	[21]
15М	12,0	12,6	13,2	13,7	14,2	14,7	—	[6, 21]
20М	11,2	12,6	13,0	13,7	14,2	14,7	14,8	[6, 22]
15ХМ	11,9	12,6	13,2	13,7	14,0	14,3	—	[5, 6, 21]
20ХМ, 20ХМА	12,1	12,8	13,0	13,6	14,0	14,3	—	[6, 22]
30ХМ, 30ХМА	12,3	12,5	12,9	13,9	14,4	14,6	—	[6, 21]
35ХМ, 35ХМА	12,3	12,6	—	14,5	14,6	—	—	[21]
15ХС	11,9	12,6	13,2	13,7	14,0	14,3	—	[5, 6, 21]
38ХС, 40ХС	11,7	12,7	—	14,0	—	14,8	—	[21]
Х9С2	11,3	12,1	12,8	14,1	14,3	14,3	14,2	[6]
Х6М	12,6	13,2	13,7	14,0	14,3	—	—	[6]
Х12М	11,2	12,5	12,3	13,7	14,0	14,3	—	[5, 6, 21]

Марка	Температура, °С							Литература
	100	200	300	400	500	600	700	
27СГ, 35СГ	11,5	12,6	—	14,0	—	14,8	—	[21]
50С2Г	10,6	11,2	12,2	12,9	13,4	13,7	14,1	[6]
25Н	12,2	12,2	—	13,8	—	14,4	—	[21]
Н28	13,7	15,3	16,3	17,0	17,5	17,8	18,1	[6]
12ХН2	12,6	13,8	—	14,8	—	14,3	—	[21]
12ХН3А, 20ХН3А	11,8	13,0	—	14,2	—	15,6	—	[21]
Х20Н12	17,3	17,5	17,8	18,0	18,3	18,5	18,8	[6]
2Х25Н20	14,4	15,2	16,1	16,5	16,8	17,2	17,6	[6]
30ХН3, 30ХН3А	11,4	12,3	12,8	13,2	13,4	13,7	13,7	[6]
Х18Н11Б	16,7	16,9	17,1	17,7	18,3	18,8	19,3	[6]
Х18Н9М	17,3	17,5	17,8	18,0	18,3	18,5	18,8	[6]
33ХН3МА	10,8	11,6	—	13,3	13,7	—	—	[21]
4Х14НВ2М(ЭИ-69)	—	—	17,8	—	18,0	—	—	[22]
1Х14Н14В2М (ЭИ-257)	16,6	16,7	17,3	17,2	18,2	19,1	19,1	[6, 22]
10Х2Ф	12,2	12,7	13,0	13,5	13,8	14,2	14,8	[6]
40ХФА	11,0	—	12,0	—	—	14,5	—	[21]
10Х2ФВ	10,5	11,3	12,6	12,9	13,4	13,6	13,8	[6]
12ХМФ	13,6	13,7	14,0	14,2	14,5	14,7	14,8	[6]
12Х1МФ	10,8	11,8	12,35	12,8	13,0	13,65	13,8	[21]
38ХМЮА	13,0	14,0	—	14,8	—	16,0	—	[21]
18Х2Н4ВА	14,5	14,5	—	14,3	—	14,2	—	[21]
25ХНВА	10,7	13,1	—	14,6	—	13,2	—	[21]
Х19Н8В	14,8	16,5	17,1	17,6	18,0	18,4	18,8	[6]
Х18Н9С2	16,2	17,1	17,9	18,6	19,2	19,9	20,5	[6]
Х23Н13(ЭИ-319)	14,9	15,7	16,6	17,1	17,5	17,8	18,2	[6, 22]
25Х2МФА	11,3	11,4	—	13,9	—	14,4	—	[6, 22]
Жаропрочные стали:								
Ж-1 (1Х13)	10,3	11,6	10,7	12,1	12,4	12,6	12,9	[6, 22]
Ж-2 (2Х13)	9,6	10,4	10,6	10,9	11,4	11,8	12,1	[6, 22]
Ж-3 (3Х13)	10,2	11,1	11,6	11,9	12,3	12,5	12,8	[6, 22]
Ж-4 (4Х13)	9,8	11,0	11,6	12,0	12,4	12,5	12,9	[6, 22]
Ж-18	10,0	—	—	—	11,1	11,3	11,5	[21]
Нержавеющие стали:								
Х18Н25С2	14,2	17,5	—	—	—	19,8	—	[22]
Х18Н9 (ЭЯ-1)	17,3	17,5	17,8	18,0	18,3	18,5	18,8	[6]
1Х18Н9Т (ЭЯ-1Т)	16,6	17,0	17,2	17,5	17,9	18,2	19,3	[6, 22]
2Х18Н9 (ЭЯ-2)	17,5	18,2	18,6	19,2	20,1	20,5	20,8	[6, 21]
Специальные стали:								
Г-13	18,01	19,37	20,71	21,71	20,76	19,86	20,49	[6]
Г20Х12Ф	15,4	17,6	18,9	21,2	21,6	23,1	25,0	[6]
Г21Х15Т	15,3	17,6	19,8	21,8	22,7	23,0	24,1	[6]
Р18	11,23	11,71	11,98	12,20	12,41	12,62	12,97	[6]

Температурный коэффициент линейного расширения цветных металлов и сплавов при 20°C

Марка	$\alpha, 10^{-6} \text{ град}^{-1}$	Литература	Марка	$\alpha, 10^{-6} \text{ град}^{-1}$	Литература
Алюминиевые сплавы					
Д1, Д16, Д18	12,9	[5]	АЛ 8	24,5	[5]
Авиаль АВ	23,5	[23]	АЛ 9	21,5	[5]
Магналий АМГ-5	23,9	[23]	АЛ 10	20,5	[5]
АЛ 1	22,3	[5]	А, АМц	24,0	[24]
АЛ 2, АЛ 4, АЛ 6, АЛ 13	20,0	[5, 23]	АМц	23,4	[24]
АЛ 3, АЛ 12	22,0	[5, 23]	АМц-5	23,9	[24]
АЛ 5	21,0	[5]	АК-4, АК-8	22,0	[24]
АЛ 7	22,7	[5]			
Бронзы					
Бр. ОФ 4-0,25	17,6	[23]	Бр. С 30	18,4	[23]
Бр. ОФ 6,5-0,4	17,1	[23]	Бр. ОНС 11-4-3	17,0	[5]
Бр. ОФ 7-02	17,1	[23]	Бр. А 7	15,9	[23]
Бр. ОФ 10-1	17,0	[5, 23]	Бр. А 10	17,0	[23]
Бр. ОЦ 4-3	18,0	[7, 10]	Бр. АЖ 9-4	18,1	[23]
Бр. ОЦ 8-4	16,6	[5, 23]	Бр. АЖН 10-4-4	17,1	[23]
Бр. ОЦ 10-2	18,3	[5, 23]	Бр. АЖН 11-6-6	14,9	[23]
Бр. ОЦС 6-6-3	17,1	[5, 23]	Бр. АМц 9-2	17,0	[23]
Бр. ОС 1-22	18,4	[23]	Бр. АЖМц 10-3-1,5	16,0	[23]
Бр. ОС 5-25	17,6	[5]	Бр. Мц 5	20,4	[23]
Бр. ОС 7-17	17,3	[5]	Бр. КМц 3-1	15,8	[23]
Бр. ОС 8-12	17,1	[5]	Бр. Б-2	17,4	[23]
Латуни					
Л 62	20	[5, 23]	ЛМц 58-2	21,2	[5, 23]
Л 68, Л 70	19	[23]	ЛЖМц 59-1-1	22	[5, 23]
Л 80	18,8	[5, 23]	ЛЖМц 52-4-1	22,7	[23]
Л 85	18,7	[5, 23]	ЛО 62-1	19,3	[5]
Л 90, Л 96	17	[5, 23]	ЛО 70-1	19,7	[5, 23]
ЛА 85-0,5	18,6	[23]	ЛО 90-1	18,4	[5]
ЛАН 59-3-2	19	[23]	ЛС 59-1	19	[23]
ЛК 80-3	17	[23]	ЛС 64-2	18	[5]
ЛКС 80-3-3	17	[23]	ЛС 74-3	17,5	[23]
			ЛН-65-5	18,2	[23]
Сплавы магния и никеля					
МА1 — МА3	26	[5]	Монель	14,5	[5, 23]
МЛ2 — МЛ6	26,4	[5]	Монель К	12,9	[23]
ТБ	15,3	[23]	Манганин	16	[23]
ТП	12,0	[5]	Нейзильбер	18,4	[5]
Константан	14,4	[5, 23]	Ферронихром	13	[23]
Алюмель	13,7	[5]	Мельхиор	16	[5]
Хромель	12,8	[23]	Никелевые бронзы	14	[23]
Копель	14	[5]			

Таблица 9.7

Температурный коэффициент линейного расширения строительных материалов

Наименование	$t, ^\circ\text{C}$	$10^{-6} \alpha, \text{град}^{-1}$	Литература
Асфальт	18÷25	200	[1]
Бакелит	22÷60	22	[10]
Бетон	20	10÷14	[7]
Бумага (твердая)	0÷50	10	[10]
Гранит	20	8,3	[10]
Глина	25÷100	8,1	[10]
Дерево: бук	20	2,57	[10]
ясень	0÷100	9,51	[10]
каштан	20	6,49	[10]
вяз	20	5,65	[10]
красное	20	3,61	[10]
клен	20	5,38	[10]
дуб	20	4,92	[10]
сосна	20	5,41	[10]
Известняк	20	4÷9	[7]
Кирпич	20	3÷9	[7]
Мрамор	75÷100	15	[10]
Цемент	20	10÷14	[10]
Фибра	18÷25	9	[1]
Шифер	20	6÷10	[10]

Таблица 9.8

Температурный коэффициент линейного расширения пластмасс и каучуков

Наименование	$t, ^\circ\text{C}$	$10^{-6} \alpha, \text{град}^{-1}$	Литература
Аминопласты	20	25÷53	[21]
Асбовинил	20	33÷40	[21]
Асботекстолит	20	25÷28	[21]
Винипласт	20	40	[21]
Волокнит	20	30	[21]
Воск	0÷100	240	[1, 12]
Гетинакс	20	20	[22]
Капрон	—	100	[21]
Каучук	20	66	[10]
Оргстекло авиационное	—	36	[21]
Оргстекло светотехническое	—	34,3	[21]
Парафин	20	130	[10]
Полиапролактан	—	6÷15	[10]
Полистирол	20	70	[21]
Полиэтилен	20	230	[21]
Резина обыкновенная	20	220	[21]
Резина твердая	20÷60	80	[10]
Стеклотекстолит	20÷100	0,8	[21]
Текстолит	20	33÷40	[21]
Тefлон (фторопласт-3)	20	6÷220	[21]
Целлюлоид	20	130	[21]
Эбонит	25÷35	84,2	[10]
Эпоксидные смолы (твердые)	—	115	[21]
Этролы целлюлозные	—	7÷160	[21]

Таблица 9.9

Температурный коэффициент линейного расширения стекла

Наименование	$t, ^\circ\text{C}$	$10^{-6} \alpha, \text{град}^{-1}$	Литература
Белое	0÷500	6	[12]
Кварцевое*	—196÷16	0,256	[10]
	0÷30	0,42	[10]
	0÷100	0,50	[10]
	0÷800	0,546	[10]
	0÷1200	0,585	[10]
Корнинг 790	0÷350	0,8	[12]
Корнинг 774	0÷350	3,2	[12]
Корнинг 8800	0÷350	6,1	[12]
В—S-крон	18÷100	9,12	[1]
	200÷500	9,0	[1]
	540÷560	39,3	[1]
Si-крон	37	9,20	[1]
	93	10,4	[1]
	151	10,61	[1]
	212	11,11	[1]
Крон легкий	2÷400	10,2	[1]
	500÷520	55,5	[1]
Крон	16÷94	9,03	[1]
Крон О 1168	15÷95	9,5	[6]
Ва-крон	23÷500	9,00	[1]
	570÷610	64,9	[1]
Нейтральное	—	8	[6]
Оптическое KRS-5 (42% TiBr; 58% TiI)	—50÷20	61	[3]
	20÷100	58	[3]
Оптическое KRS-6 (40% TiBr; 60% TiI)	—50÷20	55	[3]
Оптическое KRS-13 (65% AgBr; 35% AgCl)	20	39	[3]
Пирекс	0÷100	3	[6, 7]
	20÷200	3,1	[6]
	25÷500	3,8	[12]
Стекло для рентгеновских трубок			
Термометрическое Иена 16''' ^{2*}	0÷100	8,1	[10]
Термометрическое Иена 59'''	—190÷16	4,24	[10]
	0÷100	5,8	[10]
Термометрическое 2954	0÷100	6,28	[12]
Термометрическое тюрингское мягкое	0÷100	9,2	[12]
Ва—Si-флинт легкий	7÷90	5,23	[1]
Ва-флинт	22÷500	8,8	[1]
Ва-флинт легкий	10÷100	9,0	[1]
Флинт легкий	22÷450	8,8	[1]
	490÷510	34,7	[1]
Si-флинт	20÷100	8,03	[1]
Флинт О 118	0÷100	7,3	[6]
Химическое посудное № 23; 846	0÷100	9	[12]

* Применяются интерполяционные формулы:

 $\alpha \cdot 10^6 = 0,363 + 1,813 \cdot 10^{-3} t - 3,4 \cdot 10^{-6} t^2$ ($-253 \leq t \leq 100^\circ\text{C}$); $\alpha \cdot 10^6 = 0,395 + 1,292 \cdot 10^{-3} t - 1,689 \cdot 10^{-6} t^2$ ($0 \leq t \leq 500^\circ\text{C}$).

** Применяются интерполяционные формулы:

 $\alpha \cdot 10^6 = 7,222 + 5,16 \cdot 10^{-3} t + 7,49 \cdot 10^{-6} t^2 + 101,4 \cdot 10^{-10} t^3$ ($-253 \leq t \leq 100^\circ\text{C}$); $\alpha \cdot 10^6 = 7,78 + 2,96 \cdot 10^{-3} t$ ($20 \leq t \leq 480^\circ\text{C}$).

Таблица 9.10

Средний температурный коэффициент линейного расширения керамических материалов [1]

Наименование	Интервал температуры, °C	$\bar{\alpha}$, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$
Алюминия окись (крупнозернистая, плавленная)	20÷300 20÷600 20÷900 20÷1200 20÷1500	6,7 7,6 8,1 9,0 10,2
Алюминия окись (крупнозернистая, спекшаяся)	20÷300 20÷600 20÷900 20÷1200 20÷1500	5,9 7,2 8,2 9,0 9,6
Бериллия окись (спекшаяся)	25÷300 25÷600 25÷900	8,0 9,6 10,5
Магния окись (крупнозернистая, плавленная)	20÷300 20÷600 20÷900 20÷1200 20÷1500	13,3 13,5 13,9 15,0 16,0
Кальция окись (крупнозернистая, плавленная)	20÷300 20÷600 20÷900 20÷1200 20÷1500	10,2 11,6 12,8 13,7 14,7
Титана окись (крупнозернистая, плавленная)	20÷300 20÷600 20÷900 20÷1200 20÷1450	7,1 7,7 8,2 8,7 9,1
Тория окись (мелкозернистая, плавленная)	20÷300 20÷600 20÷900 20÷1200 20÷1500	7,1 8,5 9,0 10,3 10,4
Циркония окись (зернистая, кубической структуры, плавленная)	20÷300 20÷600 20÷900 20÷1200 20÷1500	7,6 9,2 10,0 10,8 11,6
Циркония окись (крупнозернистая, плавленная)	20÷300 20÷600 20÷900 20÷1200 20÷1500	6,9 8,4 8,8 9,5 9,4
Смесь $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ (мелкозернистая)	20÷300 20÷600 20÷900 20÷1200 20÷1300 18÷2000	3,7 4,2 4,7 5,6 5,8 10,5
Смесь $\text{ZrO}_2 \cdot \text{V}_2\text{O}_5$ (масса Нерста)		
Смесь $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$ (мелкозернистая)	20÷300 20÷600 20÷900 20÷1200 20÷1450	0 0,2 1,7 3,4 4,4
Смесь $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (крупнозернистая, плавленная)	20÷300 20÷600 20÷900 20÷1200 20÷1500	5,2 7,5 8,4 9,1 9,6
Карбид кремния SiC (перекристаллизованный)	20÷300 20÷600	3,8 4,3

Продолжение табл. 9.10

Наименование	Интервал температуры, °C	$\bar{\alpha}$, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$
Карбид кремния SiC (перекристаллизованный)	20÷900 20÷1200 20÷1500	4,5 4,8 5,2
Карбид бора B_4C (горячая формовка)	20÷300 20÷600 20÷900	5,2 5,3 5,8
Фторид кальция CaF_2 (спекшийся)	20÷300 20÷600 20÷900	22,3 24,8 26,1
MgF_2 (мелкозернистый)	20÷300 20÷600 20÷900 20÷1000	10,7 13,0 14,5 14,8
Кирпич карборундовый	20÷600 20÷900 20÷1200	5,2 5,8 6,0
Кирпич шамотный	20÷600 20÷900 20÷1500	7,5 6,7 5,9
Кирпич диносовый	20÷600 20÷900 20÷1500	22 13 8,6
Фарфор берлинский [12]	20÷100	3,0
марквардовский	—	5,2
технический [6]	0 20÷800 100÷1400	2,5 4,13 5,53
изоляционный [7]	20	3,3
огнеупорный [7]	20	3÷6
лабораторный [7]	—	2÷5
высоковольтный [10]	—	3,79
Фаянс глиняный [5]	20÷700	5,4
технический [5]	20÷750	5,0
Янтарь (прессованный) [5]	0÷75	57

Таблица 9.11

Температурный коэффициент линейного расширения квасцов [2,3]

Наименование	t , °C	$10^{-6} \bar{\alpha}$, град^{-1}	Наименование	t , °C	$10^{-6} \bar{\alpha}$, град^{-1}
Аммиачные квасцы	—160 —140 —120 —100 —80 —60 —40 —20 0	0,80 1,13 1,50 2,13 2,84 3,75 5,00 6,13 6,65	Калиевые квасцы	—170 —135 —103 —72 —43 —18 5	1,54 1,74 3,10 4,30 5,34 7,94 9,10

9.3. ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Тепловое расширение жидкостей и газов изотропно и характеризуется температурными коэффициентами объемного расширения (истинным и средним). Температурный коэффициент объемного расширения газов при увеличении температуры приближается к значению температурного коэффициента объемного расширения идеального газа, зависящего только от абсолютной температуры газа, T , °K: $\beta = 1/T$.

**Температурный коэффициент объемного расширения жидкостей и газов. Элементы
и неорганические соединения**

Приведены значения среднего температурного коэффициента объемного расширения в указанном интервале температур или значения истинного температурного коэффициента объемного расширения при данной температуре. Значения в скобках — первые два ($c = 0$) или три коэффициента интерполяционной формулы (t , °C):

$$\beta = a \cdot 10^{-3} + b \cdot 10^{-5} \cdot t + c \cdot 10^{-8} \cdot t^2.$$

Вещество	Состояние	P , атм	t , °C	β или $\bar{\beta}$, $10^{-3} \text{ град}^{-1}$	Литература
Ag	Жидкость	1	961 ÷ 1100	0,111	[1]
Al	»	1	660 ÷ 1100	0,113	[1]
Ar	»	1	—189 ÷ —186	4,54	[25]
	Газ	1	—100	3,648	[12]
		1	100	3,676	[26]
		1	200	3,673	[26]
		1	300	3,672	[26]
		1	400	3,671	[26]
		10	—100	0,3952*	[27]
		10	100	0,3658	[28]
		10	200	0,3680	[28]
		10	300	3,3682*	[27]
		10	400	0,3683	[28]
		100	100	0,3639	[28]
		100	200	0,3822	[28]
		100	300	0,3829*	[27]
		100	400	0,3832	[28]
		1000	100	1,1377	[6]
B ₅ H ₉	Жидкость	1	—45 ÷ 10	1,25*	[25]
Bi	»	1	271 ÷ 630	0,122	[1]
		1	360 ÷ 630	0,121	[1]
Br ₂	»	1	0	1,11	[1]
		1	20	1,132	[12]
		1	0 ÷ 58	{ 1,06218 1,87714 —0,30854 }	[12]
C ₂ N ₂	Газ	1	0	3,96	[26]
		1	100	3,83	[26]
		1	200	3,88	[26]
CO	Жидкость	1	—205 ÷ —192	4,91	[25]
	Газ	1	0	3,647	[26]
		1	0 ÷ 100	3,671	[26]
		1	0 ÷ 100	3,669	[10]
		1	200	3,668	[26]
		100	100	0,4053	[29]
		100	200	0,4073	[6]
		1000	100	1,496	[29]
		1000	200	0,9632	[6]
CO ₂	Жидкость	1	—50	4,95	[25]
	Газ	1	0	3,751	[10]
		1	0 ÷ 100	3,723	[10]
		1000 мм рт. ст.	0	3,6856	[4]
		То же	100	3,7248	[4]
		2621 мм рт. ст.	0	1,097	[10]
		То же	64 ÷ 100	6,574	[10]
CS ₂	Газ	1	20	1,218	[12]
		1	—34 ÷ 60	{ 1,1398 1,37065 1,91225 }	[4]
Cd	Жидкость	1	320 ÷ 350	0,170	[1]
		1	320 ÷ 544	0,137	[1]
Cl ₂	»	1	—101 ÷ —33,6	1,41	[25]
		1	—80 ÷ —33,6	1,49	[28]
		1	—40	1,53	[1]
	Газ	1	0	3,90	[10, 26]
		1	0 ÷ 100	3,830	[10, 26]

Вещество	Состояние	P , атм	t , °C	β или $\bar{\beta}$, $10^{-3} \text{ град}^{-1}$	Литература
Cl ₂	Газ	1	100	3,77	[26]
		1	200	3,83	[26]
Cs	Жидкость	1	28 ÷ 50	0,341	[1]
		1	50 ÷ 123	0,348	[1]
		1	100	0,29*	[27]
Cu	»	1	1083 ÷ 1295	0,199	[1]
F ₂	»	1	—200	4,243*	[27]
		1	—218 ÷ —188	3,0	[1]
Ga	»	1	100	0,121	[5]
		1	200	0,1143	[9]
		1	300	0,110	[9]
		1	400	0,1066	[9]
		1	600	0,1023	[9]
		1	800	0,0992	[9]
		1	900	0,0973	[5]
H ₂	»	1	—259 ÷ —252,8	12,6	[1, 5]
		1	—255	13,0	[1]
	Газ	1	—100	3,661	[12]
		1	100	3,659	[12]
		1	200	3,658	[12]
		1	300	3,657	[12]
		1	400	3,656	[12]
		200	0 ÷ 100	3,32	[10]
		400	0 ÷ 100	2,95	[10]
		600	0 ÷ 100	2,61	[10]
		800	0 ÷ 100	2,42	[10]
HCl	»	1	0	3,769	[26]
HCN	Жидкость	1	—14	1,95	[26]
H ₂ O	Жидкость, на линии насы- щения	1	0	—0,064	[5]
		1	10	0,070	[5]
		1	20	0,182	[5]
		1	50	0,449	[5]
		1	100	0,752	[5]
		1	200	1,33	[5]
		1	300	2,92	[5]
		1	350	6,68	[5]
	Жидкость	1	20	0,207	[12]
	Газ	1	0 ÷ 120	4,187	[10]
		1	0 ÷ 140	4,189	[10]
		1	0 ÷ 160	4,071	[10]
		1	0 ÷ 200	3,938	[10]
		1	0 ÷ 250	3,799	[10]
		100 мм рт. ст.	100	4,187	[4]
		»	200	3,938	[4]
H ₂ S	»	1	0	3,82	[26]
		1	100	3,75	[26]
H ₂ SO ₄	Жидкость	1	20	0,5758	[12]
		1	0 ÷ 30	{ 0,5758 }	[4, 12]
				{ —0,43 }	
He	»	1	—269,65	96,14*	[27]
		5	—269,65	57,10*	[27]
		10	—269,65	38,66*	[27]
	Газ	1	—100	3,658	[26]
		1	100	3,658	[12]
		1	200	3,658	[12]
		1	300	3,658	[12]
		1	400	3,658	[12]
		10	—200	0,3805*	[27]
		10	—100	0,361*	[27]
		10	100	0,3704*	[27]
		10	200	0,3680*	[27]
		10	300	0,3672*	[27]
		10	400	0,3668*	[27]

Вещество	Состояние	P , атм	t , °C	β или $\frac{\beta}{10^{-8}}$ град $^{-1}$	Литература
He	Газ	100	—200	0,356*	[27]
		100	—100	0,3116*	[27]
		100	100	0,4161*	[27]
		100	200	0,3902*	[27]
		100	300	0,3813*	[27]
		100	400	0,377*	[27]
		1000	100	0,8359*	[27]
Hg	Жидкость	1000	200	0,5944*	[27]
		1	50	0,181	[5]
		1	0 ÷ 100	{ 0,18182 }	[4]
		1	100	{ 0,0078 }	[5]
		1	24 ÷ 299	{ 0,18163 }	[12]
				{ 0,01155 }	
				{ 0,0021187 }	
		1	200	0,183	[5]
		1	300	0,185	[5]
		1	500	0,186	[5]
I	»	1	800	0,188	[5]
		1	107 ÷ 150	0,800	[12]
K	»	1	20 ÷ 100	0,280	[1]
		1	100 ÷ 150	0,285	[1]
		1	100 ÷ 300	0,283*	[27]
		1	500 ÷ 700	0,377*	[27]
Kr	Газ	1	100	3,311	[26]
		1	200	3,5935	[26]
		1	300	3,6756	[26]
Li	Жидкость	1	185 ÷ 235	0,174	[1]
		1	200 ÷ 400	0,198*	[27]
		1	500 ÷ 700	0,2004*	[27]
Mg	»	1	650 ÷ 800	0,380	[1]
N ₂	Жидкость в тройной точке	1	—210	21,0	[25]
	Жидкость	1	—205 ÷ —184	5,88	[25]
	Газ	1	—100	3,681	[12]
		1	0	3,673	[10]
		1	0 ÷ 100	3,671	[10]
		1	100	3,670	[12]
		1	200	3,668	[12]
		1	300	3,667	[12]
		1	400	3,666	[12]
		10	—100	0,3883	[28]
		10	100	0,3670	[28]
		10	200	0,3698	[28]
		10	300	0,3694	[28]
		10	400	0,3684	[28]
		100	—100	0,5504	[28]
		100	100	0,4103	[28]
		100	200	0,4038	[28]
		100	300	0,3974	[28]
		100	400	0,3928	[28]
		1000	100	1,443	[28]
		1000	200	1,439	[28]
		1000	300	0,758	[28]
NH ₃	Жидкость	1000	400	0,670	[28]
	Газ	1	—50	1,93	[25]
		1	0	3,860	[10]
		1	0 ÷ 100	3,800	[10]
		1	100	3,808	[4]
		1	200	3,779	[4]
		1	300	3,759	[4]
		10	100	0,325	[28]
		10	200	0,363	[28]
		10	300	0,370	[28]
		00	300	0,316	[28]

Вещество	Состояние	P , атм	t , °C	β или $\frac{\beta}{10^{-3}}$ град $^{-1}$	Литература
NO	»	1	0	3,677	[26]
		1	100	3,673	[26]
		1	200	3,669	[26]
N ₂ O	»	1	0	3,761	[26]
		1	200	3,72	[26]
Na	Жидкость	1	100÷180	0,275	[1]
		1	100÷700	0,390	[1]
		1	100÷235	{ 0,280 }	[1]
NaCl	20,6%-ный раствор в H ₂ O	1	20	0,414	[12]
		1	0÷29	{ 0,3640 }	[12]
Ne	Газ	1	—100	3,66	[10]
		1	100	3,659	[10]
		1	200	3,659	[10]
		1	300	3,659	[10]
		1	400	3,656	[10]
		1	500	3,81	[10]
		10	—200	0,385	[28]
		10	—100	0,3635	[28]
		10	100	0,3708	[28]
		10	200	0,3684	[28]
		10	400	0,3672	[28]
		100	—200	0,407	[28]
		100	—100	0,334	[28]
		100	100	0,420	[28]
		100	200	0,3945	[28]
		100	400	0,3805	[28]
O ₂	Жидкость	1	—210÷—182	4,0	[1]
	Газ	1	0÷100	3,67	[4]
		10	—170÷—180	4,831*	[30]
		10	—205÷—189	3,85	[25]
		10	100	3,66	[28]
		100	—170÷—180	4,196*	[30]
		100	0÷100	4,86	[10]
		1000	0÷100	2,41	[10]
O ₃	Жидкость	1	—183	2,0	[25]
P	»	1	50÷60	0,52	[1]
PBr ₃	»	1	20	0,868	[12]
		1	0÷100	{ 0,8472 }	[12]
		1	20	{ 0,43672 }	[12]
PCl ₃	»	1	—36÷75	{ 0,25276 }	[12]
		1	—36÷75	{ 1,154 }	[12]
		1	—36÷75	{ 1,12862 }	[12]
PH ₃	Газ	1	0	3,79	[26]
		1	100	3,738	[26]
POCl ₃	Жидкость	1	20	1,116	[12]
		1	0÷107	{ 1,06431 }	[12]
		1	0÷107	{ 1,12666 }	[12]
		1	0÷107	{ 0,5299 }	[12]
Pb	»	1	327÷825	0,120	[1]
Pu	»	1	—	0,05	[5]
Rb	»	1	40÷140	0,339	[1]
		1	100	0,3*	[27]
S	»	1	115	0,430	[1]
		1	134	0,439	[1]
		1	152	0,490	[1]
		1	165	0,170	[1]
		1	178	0,298	[1]
		1	210	0,344	[1]

Вещество	Состояние	P , атм	t , °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-8} град $^{-1}$	Литература
S	Жидкость	1	278	0,366	[1]
		1	357	0,338	[1]
SO ₂	»	1	-50	1,70	[25]
	Газ	1	0	3,98	[26]
		1	0 ÷ 100	3,903	[10]
		1	100	3,87	[26]
		1	200	3,90	[26]
		1000 мм рт. ст.	0 ÷ 100	3,980	[10]
SF ₆	»	10	100	0,3126	[31]
		10	200	0,3607	[31]
Sb	Жидкость	1	631 ÷ 1074	{ 0,041 }	[1]
SiCl ₄	»	1	20	1,430	[12]
		1	-32 ÷ 57	{ 1,29412 }	[12]
				{ 2,18414 }	
				{ 4,08642 }	
Sn	»	1	232 ÷ 400	0,106	[1]
		1	400 ÷ 700	0,105	[1]
		1	232 ÷ 1600	0,100	[1]
Tl	»	1	302 ÷ 351	0,150	[9]
Xe	Газ	1	100	2,977	[26]
		1	200	3,565	[26]
		1	30	3,552	[26]
Zn	Жидкость	1	419 ÷ 543	0,147	[1]
		1	419 ÷ 918	{ 0,217 }	[1]
				{ 0,198 }	

* Вычислено по плотности, приведенной в указанной работе.

Таблица 9.13

Температурный коэффициент объемного расширения жидкостей и газов. Органические соединения

Пояснения те же, что и к табл. 9.12.

Вещество	Состояние	P , атм	t , °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-8} град $^{-1}$	Литература
CH ₄ , метан	Газ	1	-150 ÷ -50	5,798*	[27]
		1	-100 ÷ 0	4,471*	[27]
		1	-50 ÷ 50	3,580*	[27]
		100	-50 ÷ 50	8,173*	[27]
CH ₄ O, метиловый спирт	Жидкость	1	20	1,199	[12]
		1	0 ÷ 61	{ 1,1342 }	[4]
				{ 1,13635 }	
				{ 0,8741 }	
CH ₂ O ₂ , муравьиная кислота	»	1	20	1,025	[12]
		1	5 ÷ 104	{ 0,99269 }	[12]
				{ 0,62514 }	
				{ 0,5965 }	
CH ₃ Br, метил бромистый	»	1	20	1,684	[12]
		1	-4 ÷ 28	{ 1,41521 }	[12]
				{ 3,31528 }	
				{ 11,3809 }	
CH ₃ I, метил иодистый	»	1	20	1,273	[12]
		1	5 ÷ 39	{ 1,144 }	[12]
				{ 4,0465 }	
				{ -2,7393 }	

Вещество	Состояние	P , атм	t , °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-3} град $^{-1}$	Литература
CHCl_3 , хлороформ	Жидкость	1	20	1,273	[12]
		1	0÷63	$\left\{ \begin{array}{l} 1,10715 \\ 4,66473 \\ -1,74328 \end{array} \right\}$	[4]
C_2H_6 , этан	»	1	—130÷—73	2,4	[25]
	Газ	1	— 50÷50	3,78*	[32]
		1	100÷300	2,708*	[32]
C_2H_4 , этилен	»	1	—100÷0	4,721*	[32]
		1	— 50÷50	3,739*	[32]
		1	0÷100	3,148*	[32]
		100	— 50÷50	2,280*	[32]
		100	0÷100	1,675*	[32]
C_2H_2 , ацетилен	»	1	0	3,772	[10]
		1	0÷100	3,739	[10]
$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$, этиловый спирт	Жидкость	1	20	1,12	[12]
		1	27÷46	$\left\{ \begin{array}{l} 1,02 \\ 2,20 \end{array} \right\}$	[4]
$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$, этиленгликоль	»	1	20	0,6375	[12]
		1	11÷55	$\left\{ \begin{array}{l} 0,5657 \\ 1,7074 \\ 0,293 \end{array} \right\}$	[12]
$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$, уксусная кислота	»	1	20	1,071	[12]
		1	16÷107	$\left\{ \begin{array}{l} 1,063 \\ -0,12636 \\ 1,6876 \end{array} \right\}$	[4]
$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$, метилформиат	»	1	20	1,563	[12]
		1	0÷10	$\left\{ \begin{array}{l} 0,35824 \\ 10,598 \\ -1,8085 \end{array} \right\}$	[12]
$\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$, этил бромистый	»	1	20	1,418	[12]
		1	—32÷54	$\left\{ \begin{array}{l} 1,33763 \\ 1,50135 \\ 1,69 \end{array} \right\}$	[12]
$\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$, этил иодистый	»	1	20	1,179	[12]
		1	10÷65	$\left\{ \begin{array}{l} 1,152 \\ 0,26032 \\ 1,4181 \end{array} \right\}$	[12]
$\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$, этил хлористый	»	1	20	1,706	[12]
		1	—32÷26	$\left\{ \begin{array}{l} 1,57458 \\ 2,81366 \\ 1,56987 \end{array} \right\}$	[12]

Вещество	Состояние	P , атм	t , °C	β или $\bar{\beta}$, $10^{-3} \text{ град}^{-1}$	Литература
$C_2H_4Cl_2$, этилен хлористый	Жидкость	1	20	1,161	[12]
		1	28÷84	$\begin{Bmatrix} 1,11893 \\ 1,0469 \\ 0,10342 \end{Bmatrix}$	[12]
C_2HCl_3O , хлораль	»	1	20	0,934	[12]
		1	13÷51	$\begin{Bmatrix} 0,9595 \\ -2,2139 \\ 5,6392 \end{Bmatrix}$	[12]
C_2H_3N , ацетонитрил	»	1	20	1,301	[4]
		1	6÷66	$\begin{Bmatrix} 1,2118 \\ 1,778 \\ 1,5322 \end{Bmatrix}$	[12]
$C_2H_5NO_3$, азотноэтиловый эфир	»	1	20	1,299	[12]
		1	9÷72	$\begin{Bmatrix} 1,0290 \\ 4,7913 \\ -1,8413 \end{Bmatrix}$	[12]
C_2H_6S , диметилсульфид	»	1	20	1,082	[12]
		1	0÷111	$\begin{Bmatrix} 1,01705 \\ 1,57606 \\ 0,19072 \end{Bmatrix}$	[12]
C_3H_8 , пропан	»	1	-68÷-30	1,9	[25]
	Газ	20	20	3,130*	[30]
		20	40	3,840*	[30]
		100	20	2,480	[32]
		100	40	2,650	[32]
		100	60	3,130	[32]
		100	80	4,00	[32]
		100	100	5,100	[32]
		200	20	2,050	[32]
		200	40	2,040	[32]
		200	60	2,180	[32]
		200	80	2,510	[32]
		200	100	2,940	[32]
C_3H_6 , пропилен	Жидкость	1	-50	1,751*	[27]
C_3H_8O , изопропиловый спирт	»	1	20	1,094	[12]
		1	0÷83	$\begin{Bmatrix} 1,04345 \\ 0,44303 \\ 2,7274 \end{Bmatrix}$	[12]
C_3H_8O , пропиловый спирт	»	1	20	0,956	[12]
		1	0÷94	$\begin{Bmatrix} 0,7743 \\ 4,9689 \\ -1,4069 \end{Bmatrix}$	[12]
C_3H_6O , аллиловый спирт	»	1	20	1,049	[12]
		1	0÷94	$\begin{Bmatrix} 0,97019 \\ 1,8725 \\ 0,36452 \end{Bmatrix}$	[12]
$C_3H_6O_2$, пропионовая кислота	»	1	20	1,102	[12]
		1	0÷133	$\begin{Bmatrix} 1,0396 \\ 1,5487 \\ 0,04301 \end{Bmatrix}$	[12]
$C_3H_6O_2$, метилацетат	»	1	20	1,427	[12]
		1	0÷58	$\begin{Bmatrix} 1,34982 \\ 0,87098 \\ 3,5562 \end{Bmatrix}$	[12]
$C_3H_6O_2$, этилформат	»	1	20	1,417	[12]
		1	0÷63	$\begin{Bmatrix} 0,36446 \\ 0,13538 \\ 3,9248 \end{Bmatrix}$	[12]
$C_3H_8O_3$, глицерин	»	1	20	0,505	[12]
C_3H_7Cl , пропил хлористый	»	1	20	1,447	[12]
		1	0÷42	$\begin{Bmatrix} 1,3306 \\ 3,8313 \\ -1,3859 \end{Bmatrix}$	[12]

Вещество	Состояние	P , атм	t , °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-3} град $^{-1}$	Литература
C_3H_7Cl , изопропил хлористый	Жидкость	1	20	1,591	[12]
		1	0÷34	{1,3696}	[12]
C_3H_7I , пропил иодистый	»	1	20	{5,5287}	[12]
		1	20	1,102	[12]
		1	10÷98	{1,0276}	[12]
		1	10÷98	{1,8658}	[12]
		1	10÷98	{-0,0051}	[12]
C_3H_5Br , аллил бромистый	»	1	20	1,241	[12]
		1	0÷69	{1,2275}	[12]
		1	0÷69	{-0,44365}	[12]
C_3H_5I , аллил иодистый	»	1	20	2,5843	[12]
		1	20	1,091	[12]
		1	0÷101	{1,0539}	[12]
		1	0÷101	{0,63572}	[12]
C_3H_5Cl , аллил хлористый	»	1	20	{1,0036}	[12]
		1	20	1,475	[12]
		1	9÷44	{1,3218}	[12]
		1	9÷44	{5,078}	[12]
		1	9÷44	{-4,1915}	[12]
C_4H_{10} , бутан	»	1	-20÷30	2,0	[25]
	Газ	20	20	2,26	[32]
		20	40	2,25	[32]
		20	60	2,47	[32]
		20	80	3,21	[32]
		20	100	4,46	[32]
		20	120	5,04	[32]
		100	20	1,95	[32]
		100	40	1,82	[32]
		100	60	1,84	[32]
		100	80	2,23	[32]
		100	100	3,06	[32]
		100	120	3,79	[32]
		200	20	1,69	[32]
		200	40	1,51	[32]
		200	60	1,48	[32]
		200	80	1,83	[32]
		200	100	2,55	[32]
		200	120	3,28	[32]
C_4H_{10} , изобутан (2-метилпропан)	»	20	20	2,40	[32]
		20	40	2,57	[32]
		20	60	3,00	[32]
		20	80	3,91	[32]
		20	100	6,05	[32]
		100	20	2,06	[32]
		100	40	2,08	[32]
		100	60	2,19	[32]
		100	80	2,45	[32]
		100	100	2,93	[32]
		200	20	1,82	[32]
		200	40	1,79	[32]
		200	60	1,82	[32]
		200	80	1,94	[32]
		200	100	2,18	[32]
$C_4H_{10}O$, бутиловый спирт	Жидкость	1	20	0,950	[12]
		1	6÷108	{0,83751}	[12]
		1	6÷108	{2,8634}	[12]
		1	6÷108	{-0,12415}	[12]
C_3H_7O , этиловый (диэтиловый) эфир	»	1	20	1,656	[12]
		1	-15÷38	{1,513243}	[4]
		1	-15÷38	{2,35918}	[4]
		1	-15÷38	{4,0512}	[4]

Вещество	Состояние	P , атм	t , °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-3} град $^{-1}$	Литература
$C_4H_8O_2$, масляная кислота	Жидкость	1	20	1,063	[12]
		1	0÷100	$\begin{Bmatrix} 1,02573 \\ 0,83760 \\ 0,34694 \end{Bmatrix}$	[12]
$C_4H_8O_2$, изомасляная кислота	»	1	20	1,068	[12]
		1	16÷118	$\begin{Bmatrix} 0,97625 \\ 2,3976 \\ -0,32145 \end{Bmatrix}$	[12]
C_4H_8O , метилэтилкетон	»	1	20	1,315	[12]
		1	0÷76	$\begin{Bmatrix} 1,18654 \\ 3,37043 \\ 0,53365 \end{Bmatrix}$	[12]
$C_4H_{10}S$, диэтилсульфид	»	1	20	1,278	[12]
		1	0÷90	$\begin{Bmatrix} 1,19643 \\ 1,80653 \\ 0,78821 \end{Bmatrix}$	[12]
C_5H_{12} , пентан	»	1	20	1,605	[12]
		1	0÷33	$\begin{Bmatrix} 1,4646 \\ 3,09319 \\ 1,6084 \end{Bmatrix}$	[4]
		20	20	1,57	[30]
		20	40	1,67	[30]
		20	60	1,85	[30]
		20	80	2,09	[30]
		20	100	2,44	[30]
		20	120	2,95	[30]
		100	20	1,43	[30]
		100	40	1,49	[30]
		100	60	1,60	[30]
		100	80	1,76	[30]
		100	100	1,97	[30]
		100	120	2,23	[30]
		200	20	1,29	[30]
		200	40	1,35	[30]
		200	60	1,42	[30]
		200	80	1,53	[30]
		200	100	1,67	[30]
		200	120	1,83	[30]
C_5H_{12} , изопентан	»	1	—100	1,25	[25]
		1	— 50	1,328	[25]
		1	0	1,533	[25]
		1	20	1,680	[12]
		1	0÷27	$\begin{Bmatrix} 1,46834 \\ 5,09626 \\ 0,6979 \end{Bmatrix}$	[10]
C_5H_{12} , неопентан	»	1	10÷60	1,6	[25]
C_5H_{10} , транс-пентен-2	»	1	0	1,46*	[27]
C_5H_{10} , цис-пентен-2	»	1	20	1,47*	[27]
C_5H_8 , изопрен	»	1	20	1,567	[13]
		1	0÷33	$\begin{Bmatrix} 1,4603 \\ 0,99793 \\ 5,60149 \end{Bmatrix}$	[10]
$C_5H_{12}O$, амиловый спирт	»	1	20	0,902	[12]
		1	—15÷80	$\begin{Bmatrix} 0,9001 \\ 0,6573 \\ 1,18458 \end{Bmatrix}$	[4]
$C_5H_{10}O$, диэтилкетон	»	1	20	1,233	[12]
		1	0÷95	$\begin{Bmatrix} 1,15342 \\ 1,88396 \\ 0,32021 \end{Bmatrix}$	[12]
				1,487	

Вещество	Состояние	<i>P</i> , атм	<i>t</i> , °C	β или $\bar{\beta}$, $10^{-3} \text{ град}^{-1}$	Литература
$C_6H_{11}Br$, амил бромистый	Жидкость	1	20	1,102	[12]
		1	0÷80	$\begin{Bmatrix} 1,02321 \\ 1,90086 \end{Bmatrix}$	[12]
$C_5H_{11}I$, амил иодистый	»	1	20	0,986	[12]
		1	20÷142	$\begin{Bmatrix} 0,92658 \\ 1,4647 \\ 0,0596 \end{Bmatrix}$	[12]
$C_5H_{11}Cl$, амил хлористый	»	1	20	1,208	[12]
		1	0÷100	$\begin{Bmatrix} 1,17155 \\ 0,50077 \\ 1,35368 \end{Bmatrix}$	[12]
C_6H_{14} , изогексан	»	1	20	1,445	[12]
		1	0÷55	$\begin{Bmatrix} 1,37022 \\ 0,97642 \end{Bmatrix}$	[10]
C_6H_{10} , диаллил	»	1	20	1,357	[12]
		1	0÷60	$\begin{Bmatrix} 1,3423 \\ -0,34339 \\ 3,8693 \end{Bmatrix}$	[12]
C_6H_6 , бензол	»	1	20	1,237	[12]
		1	11÷81	$\begin{Bmatrix} 1,17626 \\ 1,27776 \end{Bmatrix}$	[4]
$C_6H_{12}O_2$, капроновая кислота	»	1	20	0,975	[12]
		1	15÷155	$\begin{Bmatrix} 0,94413 \\ 0,68358 \\ 0,26586 \end{Bmatrix}$	[12]
$C_6H_{14}O$, диизопропиловый эфир	»	1	20	1,452	[12]
		1	0÷67	$\begin{Bmatrix} 1,2872 \\ 4,2923 \\ -0,58573 \end{Bmatrix}$	[12]
$C_6H_{14}O$, дипропиловый эфир	»	1	20	1,354	[12]
		1	0÷88	$\begin{Bmatrix} 1,2132 \\ 3,9318 \\ 1,3644 \end{Bmatrix}$	[12]
C_6H_8O , диаллиловый эфир	»	1	20	1,346	[12]
		1	0÷88	$\begin{Bmatrix} 1,2519 \\ 2,2401 \\ 0,35775 \end{Bmatrix}$	[12]
C_6H_6O , фенол	»	1	20	1,090	[12]
		1	36÷157	$\begin{Bmatrix} 0,8340 \\ 0,10732 \\ 0,4446 \end{Bmatrix}$	[4]
$C_6H_{10}O_4$, диэтилоксалат	»	1	20	1,136	[12]
		1	0÷141	$\begin{Bmatrix} 1,06031 \\ 1,0983 \\ 2,6657 \end{Bmatrix}$	[12]
C_6H_7N , анилин	»	1	0	0,850	[4]
		1	20	0,858	[12]
		1	0÷141	$\begin{Bmatrix} 0,82349 \\ 0,8408 \\ 0,10741 \end{Bmatrix}$	[12]
$C_6H_5NO_2$, нитробензол	»	1	144÷164	$\begin{Bmatrix} 0,8263 \\ 0,55249 \\ 0,13779 \end{Bmatrix}$	[12]
C_7H_8 , толуол	»	1	—50	1,013*	[27]
		1	0	1,050*	[27]
		1	50	1,138	[27]
C_7H_8O , о-креозол	»	1	66÷184	$\begin{Bmatrix} 0,71072 \\ 1,1464 \\ 0,2242 \end{Bmatrix}$	[12]

Вещество	Состояние	P , атм	t , °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-3} град $^{-1}$	Литература
C_7H_8O , <i>m</i> -креозол	Жидкость	1.	65÷194	$\left\{ \begin{array}{l} 0,77526 \\ 0,27106 \end{array} \right\}$	[12]
C_7H_8O , <i>n</i> -креозол	»	1	66÷186	$\left\{ \begin{array}{l} 0,3868 \\ 0,86476 \\ 0,53912 \end{array} \right\}$	[12]
$C_7H_{14}O_2$, амилацетат	»	1	20	$\left\{ \begin{array}{l} 0,64418 \\ 1,162 \\ 1,1501 \end{array} \right\}$	[12]
C_7H_5OCl , бензол хлористый	»	1	0÷124	$\left\{ \begin{array}{l} -0,09046 \\ 1,3015 \end{array} \right\}$	[12]
		1	20	0,880	[12]
		1	12÷46	$\left\{ \begin{array}{l} 0,85893 \\ 0,44219 \\ 0,27139 \end{array} \right\}$	[12]
C_8H_{18} , октан	Газ	20	100	1,38	[27]
		20	160	1,74	[27]
		20	200	2,25	[27]
		20	240	3,39	[27]
		20	280	7,00	[27]
		100	100	1,22	[27]
		100	160	1,39	[27]
		100	200	1,57	[27]
		100	240	1,88	[27]
		100	280	2,42	[27]
		200	100	1,11	[27]
		200	160	1,19	[27]
		200	200	1,28	[27]
		200	240	1,33	[27]
		200	280	1,44	[27]
C_8H_{18} , изооктан	Жидкость	1	0	1,158*	[27]
$C_{18}H_{10}$, этилбензол	»	1	0	0,9926*	[27]
		1	20	0,961	[12]
		1	50	1,067*	[27]
		1	24÷131	$\left\{ \begin{array}{l} 0,86172 \\ 2,5344 \\ -0,18319 \end{array} \right\}$	[12]
C_8H_{10} , <i>n</i> -ксилол	»	1	0	1,02	[27]
		1	100	1,036*	[27]
C_8H_{10} , <i>m</i> -ксилол	»	1	0	0,99	[27]
		1	50	1,134*	[27]
C_8H_{10} , <i>o</i> -ксилол	»	1	0	0,97	[27]
		1	50	0,9978*	[27]
C_9H_{20} , нонан	»	1	0	1,064*	[27]
$C_9H_{16}O_2$, бензойноэтиловый эфир	»	1	20	0,900	[12]
		1	0÷159	$\left\{ \begin{array}{l} 0,86606 \\ 0,8229 \\ 0,12084 \end{array} \right\}$	[12]
$C_{10}H_{22}$, декан	Газ	20	40	1,061	[27]
		20	60	1,116	[27]
		20	80	1,187	[27]
		20	100	1,268	[27]
		20	120	1,361	[27]
		100	40	0,970	[27]
		100	60	1,010	[27]
		100	80	1,051	[27]
		100	100	1,096	[27]
		100	120	1,138	[27]
		200	40	0,925	[27]
		200	60	0,956	[27]
		200	80	0,987	[27]
		200	100	1,016	[27]
		200	120	1,043	[27]
$C_{11}H_{24}$, ундекан	Жидкость	1	50	1,056*	[27]

Вещество	Состояние	P , атм	t , °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-3} град $^{-1}$	Литература
$C_{12}H_{26}$, додекан	Жидкость	1	50	1,020*	[27]
$C_{12}H_{16}O_2$, бензойноамиловый эфир	»	1	0	0,85	[12]
		1	20	0,848	[12]
		1	0÷198	$\left\{ \begin{array}{l} 0,81711 \\ 0,7377 \\ 0,10593 \end{array} \right\}$	[12]
$C_{13}H_{28}$, тридекан	»	1	50	0,9883*	[27]
$C_{14}H_{30}$, тетрадекан	»	1	100	1,036*	[27]
$C_{15}H_{32}$, пентадекан	»	1	100	1,019*	[27]
$C_{16}H_{34}$, гексадекан	»	1	100	0,995*	[27]
$C_{17}H_{36}$, гептадекан	»	1	200	1,184*	[27]
$C_{18}H_{38}$, октадекан	»	1	200	1,148*	[27]
$C_{18}H_{34}O_2$, олеиновая кислота	»	1	20	0,721	[12]
		1	—	$\left\{ \begin{array}{l} 0,68215 \\ 1,14053 \\ -0,539 \end{array} \right\}$	[12]
$C_{19}H_{40}$, нонадекан	»	1	200	1,117*	[27]
$C_{20}H_{42}$, эйкозан	»	1	200	1,09*	[27]

* Вычислено по плотности, приведенной в указанной работе.

Таблица 9.14

Температурный коэффициент объемного расширения жидкостей и газов. Смеси и сплавы
Пояснения те же, что и к табл. 9.12.

Вещество	Состояние	P , атм	t , °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-3} град $^{-1}$	Литература
Бензин Б-70	Жидкость	1	40	1,496	[5]
		1	150	1,752	[5]
Воздух	Газ	1	0÷100	3,670	[10]
		10	100	0,3686	[28]
		10	200	0,3693	[28]
		100	100	0,3989	[28]
		100	200	0,3979	[28]
		1000	100	1,376	[28]
		1000	200	0,898	[28]
Керосин Т-1	Жидкость	1	20	0,955	[12]
		1	24÷120	$\left\{ \begin{array}{l} 0,8994 \\ 1,396 \end{array} \right\}$	[12]
		1	250	1,646*	[27]
Масло: машинное МС-20	»	1	— 10	0,694	[5]
		1	30	0,638	[5]
		1	70	0,655	[5]
		1	100	0,669	[5]
		1	150	0,692	[5]
машинное МК-22	»	1	10	0,856	[5]
		1	50	0,886	[5]
		1	100	0,928	[5]
		1	150	0,943	[5]
оливковое	»	1	20	0,721	[12]
трансформаторное	»	1	— 20	0,67	[5]
		1	0	0,680	[5]
		1	50	0,705	[5]
		1	100	0,730	[5]

Вещество	Состояние	P , атм	t , °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-8} град $^{-1}$	Литература
Петролейный эфир	Жидкость	1	20	2,26	[12]
		1	-190÷0	{1,46}	[12]
Смеси:				{1,60}	
50% C_2H_6O — 50% H_2O	»	1	0÷39	{0,7450}	[4]
				{1,85}	
30% C_2H_6O — 70% H_2O	»	1	18÷39	{0,73}	
44,5% Pb — 55,5% Bi	»	1		{0,2929}	[4]
25% Na — 75% K	»	1	250	{10,790}	
		1	650	{-11,87}	
		1	100	0,117*	[27]
		1	300	0,125*	[27]
		1	500	0,293*	[27]
		1	650	0,311*	[27]
		1		0,319*	[27]
		1		0,349*	[27]
40% $NaNO_2$ — 53% KNO_3 — 7% $NaNO_3$	»	1	160	0,407*	[27]
		1	500	0,382*	[27]
Сплавы:					
50% Bi — 50% Hg	»	1	163÷280	0,134	[1]
67% Bi — 33% Pb	»	1	130	0,138	
57% Bi — 43% Pb	»	1	140	0,122	
70% Bi — 30% Tl	»	1	212÷325	0,131	
90% Cd — 10% Zn	»	1	255	0,153	
80% Hg — 20% Pb	»	1	250÷300	0,161	
25% Hg — 75% Pb	»	1	250÷300	0,135	
95,1% Hg — 4,9% Tl	»	1	20÷300	0,179	
74% Hg — 26% Tl	»	1	20÷300	0,161	
57,1% Hg — 42,9% Tl	»	1	20÷300	0,157	
86% Hg — 14% Zn	»	1	300÷350	0,184	
60,6% Hg — 39,4% Zn	»	1	300÷350	0,146	
50,7% Hg — 49,3% Zn	»	1	330÷360	0,2	
77% K — 23% Na	»	1	10÷100	0,286	
90% Pb — 10% Sb	»	1	250	0,123	
68% Sn — 32% Cd	»	1	175	0,123	
80% Tl — 20% Sb	»	1	200÷225	0,227	

* Вычислено по плотности, приведенной в указанной литературе.

9.4. ЭФФЕКТ ДЖОУЛЯ—ТОМСОНА

Эффектом Джоуля—Томсона называется явление, заключающееся в изменении температуры газа при его адиабатическом расширении. Количественной характеристикой эффекта служит коэффициент Джоуля—Томсона:

$$\mu = \Delta T / \Delta P, \text{ град/атм},$$

где ΔT — изменение температуры; ΔP — изменение давления газа. Коэффициент Джоуля—Томсона связан с температурным коэффициентом объемного расширения β и теплоемкостью газа при постоянном давлении C_P соотношением

$$\mu = V(\beta T - 1) / C_P,$$

где V — объем; T — температура газа. Для реальных

газов существует замкнутая область температур и давлений, внутри которой $\mu > 0$. Эта область ограничена отрезком оси температур и так называемой кривой инверсии, на которой $\mu = 0$; вне этой области $\mu < 0$. Для идеального газа $\mu = 0$.

Таблица 9.15

Коэффициент Джоуля—Томсона для гелия
при давлении до 200 атм [4.33]

t , °C	μ , град/атм	t , °C	μ , град/атм	t , °C	μ , град/атм
-190	-0,038	-50	-0,0605	150	-0,0645
-175	-0,045	0	-0,0616	200	-0,0641
-150	-0,052	50	-0,0631	250	-0,0629
-100	-0,0584	100	-0,0638	300	-0,0597

Таблица 9.16

Коэффициент Джоуля—Томсона, *град/атм*,
для аргона [33]

<i>t</i> , °C	Давление, <i>атм</i>					
	1	20	50	100	150	200
—150	1,81	—	0,002	—0,025	—0,046	—0,056
—125	1,111	1,045	0,166	0,039	0,000	—0,011
—100	0,860	0,800	0,655	0,285	0,094	0,040
—75	0,706	0,678	0,618	0,426	0,213	0,130
—50	0,595	0,574	0,522	0,396	0,265	0,188
—25	0,505	0,479	0,439	0,352	0,257	0,200
0	0,431	0,406	0,370	0,305	0,236	0,192
25	0,371	0,350	0,317	0,264	0,212	0,175
50	0,322	0,304	0,276	0,231	0,189	0,161
100	0,242	0,224	0,203	0,175	0,146	0,127
150	0,183	0,171	0,154	0,130	0,109	0,096
200	0,137	0,126	0,115	0,095	0,079	0,068
300	0,064	0,060	0,055	0,046	0,037	0,028

Таблица 9.17

Коэффициент Джоуля—Томсона, *град/атм*,
для азота [33]

<i>t</i> , °C	Давление, <i>атм</i>					
	1	20	50	100	150	200
—150	1,265	1,128	0,083	0,020	—0,008	—0,027
—125	0,855	0,792	0,548	0,133	0,040	0,006
—100	0,649	0,594	0,491	0,274	0,144	0,058
—75	0,503	0,466	0,396	0,269	0,149	0,078
—50	0,397	0,376	0,324	0,237	0,152	0,091
—25	0,322	0,301	0,264	0,200	0,142	0,092
0	0,267	0,250	0,220	0,169	0,124	0,087
25	0,222	0,206	0,181	0,140	0,105	0,078
50	0,186	0,171	0,151	0,117	0,087	0,066
100	0,129	0,119	0,103	0,077	0,055	0,042
150	0,087	0,079	0,068	0,049	0,031	0,022
200	0,056	0,048	0,040	0,026	0,014	0,006
300	0,014	0,009	0,001	—0,007	—0,013	—0,017

Таблица 9.18

Коэффициент Джоуля—Томсона, *град/атм*,
для водорода [33]

<i>t</i> , °K	Давление, <i>атм</i>					
	0	20	60	100	140	180
60	0,391	0,287	0,132	0,035	—0,017	—
65	0,333	0,259	0,136	0,052	0,000	—0,054
70	0,287	0,234	0,135	0,059	0,005	—0,039
75	0,250	0,212	0,131	0,062	0,004	—0,036
80	0,220	0,192	0,127	0,061	0,001	—0,037
85	0,195	0,174	0,122	0,059	—0,004	—0,040

Таблица 9.19

Коэффициент Джоуля—Томсона, *град/атм*,
для ксенона [33]

<i>P</i> , <i>атм</i>	Температура, °C					
	25	50	75	100	125	150
1	1,87	1,62	1,43	1,28	1,14	1,02
30	1,72	1,50	1,32	1,17	1,05	0,943
50	1,49	1,36	1,21	1,09	0,983	0,889
100	0,188	0,577	0,786	0,804	0,769	0,725
200	0,0293	0,089	0,165	0,252	0,320	0,362
300	—0,0155	0,0115	0,0435	0,0795	0,120	0,155
600	—0,0525	—0,0551	—0,0450	—0,0374	—0,0296	—0,0203
1000	—0,0820	—0,0791	—0,0737	—0,0740	—0,0734	—0,0718
2000	—0,0949	—0,0934	—0,0893	—0,0934	—0,0980	—0,1011

Таблица 9.20

Коэффициент Джоуля — Томсона, *град/атм*,
для кислорода [33]

<i>t</i> , °C	Давление, <i>атм</i>					
	1	20	50	100	150	200
—170	2,00	—0,007	—	—	—	—
—160	1,63	0,070	0,013	—0,008	—0,020	—0,032
—150	1,265	1,128	0,083	0,020	0,008	—0,027
—137,5	0,996	0,936	0,402	0,065	0,014	—0,010
—125	0,855	0,792	0,548	0,133	0,040	0,006
—112,5	0,742	0,680	0,529	0,227	0,069	0,035
—100	0,649	0,594	0,491	0,274	0,114	0,058
—75	0,503	0,466	0,396	0,269	0,149	0,078
—50	0,397	0,376	0,324	0,237	0,152	0,091
—25	0,322	0,301	0,264	0,200	0,142	0,092
0	0,267	0,250	0,220	0,169	0,124	0,087
25	0,222	0,206	0,181	0,140	0,105	0,078
50	0,186	0,171	0,151	0,117	0,087	0,066
75	0,155	0,144	0,125	0,094	0,069	0,053
100	0,129	0,119	0,103	0,077	0,055	0,042
150	0,087	0,079	0,068	0,049	0,031	0,022
200	0,056	0,048	0,040	0,026	0,014	0,006
250	0,033	0,026	0,018	0,007	0,000	—0,006
300	0,014	0,009	0,001	—0,007	—0,013	—0,017

Таблица 9.21

Коэффициент Джоуля — Томсона, *град/атм*,
для окиси углерода [33]

<i>P</i> , <i>атм</i>	Температура, °C					
	0	25	50	75	100	150
1	0,295	0,251	0,213	0,179	0,150	0,104
50	0,240	0,206	0,175	0,147	0,122	0,085
100	0,190	0,162	0,137	0,115	0,095	0,067
200	0,093	0,084	0,072	0,060	0,049	0,032
300	0,034	0,031	0,027	0,022	0,015	0,005
400	—0,001	—0,001	—0,002	—0,004	—0,008	—0,014
600	—0,034	—0,034	—0,034	—0,034	—0,034	—0,039
1000	—0,056	—0,056	—0,056	—0,057	—0,058	—0,059
3000	—0,065	—0,066	—0,067	—0,068	—0,068	—0,071

Таблица 9.22

Коэффициент Джоуля — Томсона, *град/атм*,
для углекислого газа [33]

<i>t</i> , °C	Давление, атм					
	1	20	60	100	140	200
—75	—	—0,020	—0,021	—0,023	—0,024	—0,029
—50	2,413	—0,014	—0,015	—0,016	—0,018	—0,025
—25	1,650	0,000	—0,003	—0,005	—0,006	—0,012
0	1,290	1,402	0,037	0,022	0,012	0,005
20	1,105	1,136	0,144	0,070	0,042	0,027
40	0,958	0,966	0,971	0,262	0,108	0,066
60	0,838	0,833	0,806	0,625	0,263	0,125
80	0,735	0,724	0,696	0,597	0,405	0,196
100	0,649	0,638	0,608	0,541	0,432	0,256
125	0,560	0,545	0,516	0,475	0,413	0,292
150	0,489	0,470	0,443	0,416	0,376	0,291
200	0,373	0,358	0,340	0,315	0,289	0,246
250	0,308	0,289	0,263	0,242	0,224	0,198
300	0,265	0,243	0,208	0,187	0,170	0,151

Таблица 9.23

Коэффициент Джоуля — Томсона, *град/атм*,
для метана [33]

<i>P</i> , атм	Температура, °C					
	21,1	37,8	54,4	71,1	87,8	104,4
0	0,405	0,359	0,318	0,283	0,253	0,227
17	0,425	0,375	0,333	0,298	0,267	0,239
34	0,425	0,376	0,334	0,299	0,268	0,241
51	0,410	0,365	0,324	0,290	0,259	0,233
68	0,389	0,346	0,306	0,272	0,243	0,219
85,1	0,362	0,322	0,284	0,251	0,223	0,199
102,1	0,332	0,294	0,258	0,229	0,202	0,180

Таблица 9.24

Коэффициент Джоуля — Томсона, *град/атм*,
для этана [33]

<i>P</i> , атм	Температура, °C					
	21,1	37,8	54,4	71,1	87,8	104,4
0	0,939	0,833	0,737	0,657	0,586	0,498
17	1,217	1,037	0,882	0,760	0,658	0,572
34	1,55	1,24	1,012	0,849	0,711	0,596
51	—	—	0,996	0,890	0,715	0,586
68	—	—	0,790	0,841	0,669	0,543
85,1	—	—	0,534	0,646	0,579	0,478
102,1	—	—	0,253	0,353	0,429	0,399

Таблица 9.25

Коэффициент Джоуля — Томсона, *град/атм*,
для воздуха [4]

<i>t</i> , °C	Давление, атм					
	1	20	60	100	140	180
—150	—	—	0,0450	0,0185	—0,0070	—0,0255
—140	1,0755	1,0240	0,1125	0,0440	0,0120	—0,0115
—120	0,7370	0,7155	0,5150	0,1535	0,590	0,0200
—100	0,5895	0,5700	0,4820	0,2775	0,1360	0,0655
—75	0,4795	0,4555	0,3835	0,2880	0,1855	0,1136
—50	0,3910	0,3690	0,3195	0,2505	0,1825	0,1270
—25	0,3225	0,3010	0,2610	0,2130	0,1650	0,1240
0	0,2746	0,2577	0,2200	0,1822	0,1446	0,1097
25	0,2320	0,2173	0,1852	0,1550	0,1249	0,0959
50	0,1956	0,1830	0,1571	0,1310	0,1070	0,0829
75	0,1614	0,1508	0,1293	0,1087	0,0889	0,0707
100	0,1355	0,1258	0,1062	0,0884	0,0726	0,0580
150	0,0961	0,0883	0,0732	0,0600	0,0482	0,0376
250	0,0409	0,0356	0,0254	0,0165	0,0092	0,0027

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Техническая энциклопедия.** Справочник физических, химических и технологических величин. Т. II. М., ОГИЗ, 1930.
2. **Progress in crystal physics.** V. I. Ed. R. S. Krishnan, Wiswawathan, 1958.
3. **Оптические материалы для инфракрасной техники.** Справочное издание. М., «Наука», 1965. (Авт.: Воронкова Е. М., Гречушников Б. И., Дистлер Г. И., Петров И. П.)
4. **Smithsonian physical tables.** 9-th ed., Washington, 1954.
5. **Чиркин В. С.** Теплофизические свойства материалов. М., Физматгиз, 1959.
6. **Теплофизические свойства веществ.** Справочник. Под ред. Н. Б. Варгафтика. М., Госэнергонздат, 1956.
7. **Кей Дж., Лэби Т.** Таблицы физических и химических постоянных. Пер. с англ. Под ред. К. П. Яковлева. М., Физматгиз, 1962.
8. **Физико-химические свойства элементов.** Справочник. Под ред. Г. В. Самсонова. Киев, «Наукова думка», 1965.
9. **Филянд М. А., Семенова Е. И.** Свойства редких элементов. Справочник. М., Metallurgizdat, 1953.
10. **Handbook of Chemistry and Physics.** 37-th ed., Cleveland, Ohio, 1956.
11. **Жданов Г. С.** Физика твердого тела. М., Изд-во МГУ, 1961.
12. **Справочник химика Т. I.** Под ред. Б. П. Никольского. Изд. 2-е. М.—Л., Госхимиздат, 1962.
13. **Физика и техника инфракрасного излучения.** Пер. с англ. М., «Советское радио», 1965. (Авт.: Джеминсон Э., Мак-Фи Р. Х., Плас Дж. Н. и др.)
14. **Славинский М. П.** Физико-химические свойства элементов. М., Metallurgizdat, 1952.
15. **Самсонов Г. В.** Тугоплавкие соединения. М., Metallurgizdat, 1963.
16. **Oriani K., Murphy H. S. J.** Amer. Chem. Soc., 1954, v. 2, p. 345.
17. **Свойства металлов и сплавов.** М., Metallurgizdat, 1949.
18. **Энциклопедия металлофизики.** Т. I. М., ОНТИ, 1937.
19. **Austin I. B. J.** Amer. Ceramic Soc., 1952, v. 35, p. 10.
20. **Редкие металлы.** Справочник. Пер. с англ. М., «Мир», 1965.
21. **Справочник по машиностроительным материалам.** Т. I—IV. М., Машгиз, 1959—1960.
22. **Справочник по авиационным материалам.** Изд. 5-е. Т. 1—5. Под ред. А. Т. Тумакова. М., «Машиностроение», 1959—1964.
23. **Славин Д. О., Штейман Е. Б.** Металлы и сплавы в химическом машиностроении и аппаратостроении. М., Машгиз, 1951.
24. **Либерман Л. Я., Пейсихис М. И.** Справочник по свойствам сталей, применяемых в котлотурбостроении. М., Машгиз, 1955.
25. **Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения.** М., Госэнергонздат, 1963. (Авт.: Малков М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г., Фрадков А. Б.)
26. **Техническая энциклопедия.** Справочник физических, химических и технологических величин. Т. V. М., ОГИЗ, 1930.
27. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963.
28. **Hemming F.** Wärmetechnische Richtwerte, Berlin, 1938.
29. **Michels A.** Physica, 1952, v. 18, p. 121.
30. **Day F., Felsing M. J.** Amer. Chem. Soc., 1951, v. 73, p. 4839.
31. **Scheider W. J.** Chem. Phys., 1951, v. 19, p. 845.
32. **Физико-химические свойства индивидуальных углеводородов.** Справочник. Под ред. В. М. Татевского. М., Гостоптехиздат, 1960.
33. **Landolt-Börnstein.** Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Geophysik, Technik. Aufl. 6, Bd 2, Teil 4, Berlin, 1961.

ГЛАВА 10

ТЕПЛОЕМКОСТЬ

Теплоемкость характеризует восприимчивость тела (системы) к нагреванию в конкретных термодинамических условиях и определяется как отношение количества теплоты ΔQ , сообщенной телу, к достигнутому при этом повышению температуры ΔT : $C = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \Delta Q / \Delta T$.

Теплоемкость всегда положительна и при низких температурах ($T \rightarrow 0^\circ \text{K}$) стремится к нулю.

Для количественной характеристики теплоемкости вещества обычно используют удельную, молярную или объемную теплоемкости, которые определяются соответственно как теплоемкости единицы массы, одного моля или единицы объема этого вещества. Единицами теплоемкости служат при этом $\text{дж}/(\text{г} \cdot \text{град})$, $\text{дж}/(\text{моль} \cdot \text{град})$, $\text{дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{град})$; аналогичные единицы, основанные на калории ($1 \text{ кал} = 4,1855 \text{ дж}$), рассматриваются в настоящее время как внесистемные.

Теплоемкость тела (системы) зависит от условий нагревания. В простых системах наиболее употребительны теплоемкость C_p , которая характеризует теплоемкость при нагревании в условиях постоянного давления, и C_v , которая характеризует теплоемкость при нагревании с сохранением постоянного объема. Эти величины связаны соотношением

$$C_p - C_v = \beta^2 TV / \gamma,$$

где β — температурный коэффициент объемного расширения; γ — изотермическая сжимаемость вещества.

Обобщением определения теплоемкости, пригодным для любых систем и процессов, в том числе и при наличии внешних полей, служит соотношение $C = T(\partial S / \partial T)$, где S — энтропия системы.

**10.1. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ И ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ
НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ**

Таблица 10.1

Теплоемкость элементов при температуре 298,15°С и давлении 760 мм рт. ст.

Вещество	C_p , дж/(моль·град)	Литература	Вещество	C_p , дж/(моль·град)	Литература	Вещество	C_p , дж/(моль·град)	Литература
Ac	27,2	[1]	α -Fe	25,02	[3]	P ₄ (газ)	67,2	[1]
Ag	25,49	[1]	β -Fe	26,74	[3]	Pb	26,44	[3]
Al	24,35	[2]	Ga	26,07	[1]	Pd	25,52	[2]
Ar (газ)	20,79	[3]	Gd	36,26	[3]	Pt	25,69	[2]
As	24,64	[1]	Ge	23,4	[1]	Rb	30,88	[3]
As (газ)	20,79	[1]	H (газ)	20,79	[3]	Rb (газ)	20,79	[1]
As ₂ (газ)	34,98	[1]	H ₂ (газ)	28,83	[3]	Rb ₂ (газ)	37,91	[1]
As ₄ (газ)	77,32	[1]	HD (газ)	29,20	[3]	Re	25,31	[2]
At	58,6	[1]	Hf	25,5	[1]	Rh	25,52	[2]
At ₂ (газ)	37,2	[1]	Hg	27,98	[3]	Ru	23,85	[2]
Au	25,23	[2]	Ho	27,15	[3]	S (ромбическая)	22,60	[3]
B (кристалл)	11,09	[3]	In	26,7	[1]	S (моноклинная)	23,64	[3]
B (аморфный)	11,96	[3]	Ir	25,02	[2]	S (газ)	23,68	[3]
B (газ)	20,80	[3]	I	54,44	[3]	S ₂ (газ)	32,47	[3]
B ₂ (газ)	30,56	[3]	I (газ)	20,79	[3]	S ₈ (газ)	155,5	[3]
Ba	26,36	[1]	I ₂ (газ)	36,9	[3]	Sb	25,2	[2]
Ba (газ)	20,79	[1]	K	29,96	[3]	Sb (газ)	20,79	[1]
Be	16,44	[3]	K (газ)	20,79	[3]	Sb ₂ (газ)	36,4	[1]
Bi	25,52	[3]	K ₂ (газ)	37,89	[3]	Sb ₄ (газ)	80,96	[1]
Br	75,71	[3]	Kr (газ)	20,79	[3]	Se	25,36	[3]
Br (газ)	20,79	[3]	La	27,8	[3]	Se ₂ (газ)	35,34	[3]
Br ₂ (газ)	36,1	[3]	Li	24,65	[3]	Sm	29,53	[3]
C (графит)	8,53	[3]	Li ₂ (газ)	36,07	[3]	Sn (белый)	26,36	[3]
C (алмаз)	6,12	[3]	Mg	24,6	[3]	Sn (серый)	25,77	[3]
C (газ)	20,84	[1]	α -Mn	26,32	[3]	Sr	25,11	[2]
C ₂ (газ)	29,3	[1]	γ -Mn	27,57	[3]	T ₂ (газ, нормаль- ный)	28,44	[3]
Ca	26,28	[3]	Mo	23,8	[1]	Ta	25,4	[1]
Cd	26,32	[2]	N (газ)	20,79	[3]	Tb	28,95	[3]
Ce	28,8	[1]	N ₂ (газ)	29,12	[3]	Te	25,7	[2]
Cl (газ)	21,84	[3]	Na	28,12	[3]	Th	27,32	[1]
Cl ₂ (газ)	33,84	[3]	Na (газ)	20,79	[3]	Ti	25,02	[1]
Co	24,6	[1]	Na ₂ (газ)	37,50	[3]	Ti (газ)	24,43	[3]
Cr	23,22	[2]	Nb	24,89	[2]	Tl	26,32	[2]
Cs	31,4	[1]	Nd	27,49	[4]	U	27,8	[1]
Cs (газ)	20,79	[5]	Ne (газ)	20,79	[3]	V	24,7	[1]
Cu	24,52	[2]	Ni	25,77	[2]	W	24,8	[1]
D ₂ (газ, нормаль- ный)	29,19	[3]	O (газ)	21,90	[3]	Xe (газ)	20,79	[3]
Dy	28,17	[3]	O ₂ (газ)	29,36	[3]	Zn	25,40	[2]
Er	28,11	[3]	O ₃ (газ)	39,20	[3]	Zr	25,15	[3]
F (газ)	22,75	[3]	Os	24,89	[2]	Zr (газ)	26,64	[3]
F ₂ (газ)	31,32	[3]	P	24,69	[2]			
			P ₂ (газ)	32,0	[1]			

Теплоемкость неорганических соединений при температуре 298,15°K и давлении 760 мм рт. ст.

В скобках приведены расчетные значения.

Вещество	C_p , дж/(моль·град)	Литература	Вещество	C_p , дж/(моль·град)	Литература	Вещество	C_p , дж/(моль·град)	Литература
AgBr	52,38	[3]	B ₅ Hg (газ)	79,5	[4]	CaSO ₃	91,63	[3]
AgBr (газ)	36,48	[2]	BN	12,13	[3]	CaSO ₄	99,62	[3]
Ag ₂ CO ₃	112,1	[3]	BN	20,1	[6]	CaSiO ₃	90,0	[2]
AgCl	50,78	[3]	BN (газ)	29,46	[2]	Ca ₂ SiO ₄	128,6	[3]
AgCl (газ)	35,77	[2]	BO (газ)	29,20	[3]	CaTiO ₃	97,65	[3]
AgClO ₂	87,32	[3]	B ₂ O ₂ (газ)	60,33	[3]	CdCl ₂	73,22	[3]
Ag ₂ ClO ₄	142,3	[3]	B ₂ O ₃	62,05	[3]	CdCl ₂	76,64	[7]
AgH	29,25	[4]	BaCO ₃	85,35	[3]	CdI ₂	77,53	[3]
AgI	54,43	[3]	BaCl ₂	(75,3)	[2]	CdMg	51,66	[3]
AgI (газ)	36,78	[2]	BaCl ₂ · 2H ₂ O	155,2	[3]	CdO	43,43	[3]
AgIO ₃	102,9	[3]	BaF ₂	71,21	[3]	CdS	55,2	[3]
AgMg	49,37	[2]	BaH (газ)	29,3	[4]	CdSO ₄	99,60	[3]
AgNO ₂	79,2	[2]	BaMoO ₄	140,6	[4]	CdSb	45,69	[3]
AgNO ₃	93,05	[2]	Ba(NO ₃) ₂	151,4	[3]	CdSiO ₃	88,58	[3]
Ag ₂ O	64,27	[5]	BaO	47,23	[3]	CeN	46,86	[4]
Ag ₂ O	65,56	[3]	BaSO ₄	101,8	[3]	CeO ₂	65,90	[5]
Ag ₂ S	75,31	[3]	BaTiO ₃	102,5	[3]	Ce(SO ₄) ₃	276,1	[3]
Ag ₂ SO ₄	131,4	[3]	BeH (газ)	27,03	[4]	ClF (газ)	32,09	[3]
Ag ₃ Sb	101,7	[2]	Be ₃ N ₂	69,04	[3]	ClF ₃ (газ)	65,06	[3]
Ag ₂ Se	83,68	[2]	BeO	25,40	[3]	Cl ₂ O (газ)	45,6	[3]
Ag ₂ Te	96,65	[2]	BeSO ₄	87,9	[4]	ClO ₂ (газ)	41,84	[3]
AlAg ₂	75,31	[3]	BiCl ₃ (газ)	79,58	[2]	CoCl ₂	78,49	[3]
AlAg ₃	100,8	[3]	Bi ₂ O ₃	113,5	[3]	CoF ₂	68,78	[3]
AlBr (газ)	35,87	[3]	Bi ₂ Tl	73,85	[3]	CoO	52,72	[3]
AlBr ₃	102,5	[4]	Bi ₃ Tl ₂	131,8	[3]	CoO	55,31	[8]
Al ₄ C ₃	140,2	[3]	BrCl (газ)	34,98	[3]	Co ₃ O ₄	123,1	[3]
AlCl (газ)	34,66	[3]	BrF (газ)	32,97	[3]	CoS	(47,43)	[2]
AlCu	48,12	[3]	BrF ₃	124,4	[3]	CoSO ₄	(138,3)	[2]
AlF (газ)	31,93	[3]	BrF ₃ (газ)	66,71	[3]	Cr ₃ C ₂	99,24	[3]
AlF ₃	75,14	[3]	BrF ₅ (газ)	100,1	[3]	Cr ₄ C	108,4	[3]
AlN	32,6	[2]	BrI (газ)	36,48	[3]	Cr(CO) ₆ (газ)	213,3	[3]
Al ₂ O ₃	79,01	[3]	CN (газ)	29,16	[2]	CrCl ₂	70,65	[3]
Al ₂ O ₃ · H ₂ O	131,3	[3]	C ₂ N ₂ (газ)	56,90	[3]	CrCl ₃	91,80	[3]
Al ₂ (SO ₄) ₃	259,6	[3]	CO (газ)	29,15	[3]	CrF ₃	78,74	[3]
Al ₂ TiO ₅	136,4	[3]	CO ₂ (газ)	37,12	[3]	Cr ₂ O ₃	118,7	[3]
AsCl ₃ (газ)	75,7	[2]	COS (газ)	41,63	[3]	Cr ₂ O ₃	104,6	[3]
AsF ₃	126,8	[3]	C ₂ O ₂ (газ)	65,75	[3]	CrSb	81,17	[4]
AsF ₃ (газ)	65,6	[2]	CP (газ)	29,84	[4]	CsBr	51,88	[4]
AsH ₃	38,52	[3]	CS (газ)	29,82	[2]	CsCl	(52,63)	[2]
AsN (газ)	30,42	[4]	CS ₂	75,65	[3]	CsClO ₄	107,6	[3]
As ₂ O ₃	95,65	[3]	CS ₂ (газ)	45,65	[3]	CsF	(50,63)	[2]
As ₂ O ₅	116,5	[3]	CSe ₂ (газ)	50,04	[3]	CsH (газ)	29,83	[4]
AuCl (газ)	35,44	[2]	CaC ₂	62,31	[3]	CsI	51,88	[4]
AuSb ₂	77,4	[3]	CaCO ₃	81,80	[2]	CsLi	36,99	[2]
AuSn	52,3	[4]	CaCl ₂	72,61	[3]	CuBr	54,74	[3]
BBr (газ)	32,83	[3]	CaF ₂	71,13	[2]	CuBr (газ)	36,05	[2]
BBr ₃ (газ)	67,97	[3]	CaF ₂	67,03	[3]	CuCl (газ)	35,1	[2]
B ₄ C	52,51	[3]	CaFe ₂ O ₄	153,7	[3]	CuCl ₂	79,50	[3]
BCl (газ)	31,69	[3]	Ca ₃ N ₂	113,0	[3]	Cu ₂ Cl ₂	97,03	[3]
BCl ₃ (газ)	62,61	[3]	Ca(NO ₃) ₂	149,2	[3]	CuH (газ)	29,20	[4]
BF (газ)	29,61	[3]	CaO	42,8	[3]	CuI	54,04	[3]
BF ₃ (газ)	50,53	[3]	Ca(OH) ₂	87,49	[3]	CuI (газ)	36,36	[2]
BH (газ)	29,18	[3]	Ca(PO ₃) ₂	145,1	[3]	Cu ₃ N	90,79	[4]
B ₂ H ₆ (газ)	56,40	[3]	Ca ₃ (PO ₄) ₂	231,6	[3]	CuO	44,78	[3]
B ₁₀ H ₁₄	219,3	[3]	β-Ca ₃ (PO ₄) ₂	228,2	[3]	CuO	42,30	[9]
BH ₃ O ₃	81,34	[3]	CaS	47,40	[3]	Cu ₂ O	63,64	[3]

Вещество	C_p , дж/(моль·град)	Литература	Вещество	C_p , дж/(моль·град)	Литература	Вещество	C_p , дж/(моль·град)	Литература
CuS	47,82	[3]	HgBr (газ)	36,90	[2]	MgB ₂	47,82	[3]
Cu ₂ S	76,32	[3]	HgBr ₂ (газ)	60,25	[2]	MgB ₄	70,33	[3]
CuSO ₄	100,0	[2]	HgCl	50,84	[2]	MgCO ₃	75,52	[3]
CuSb	102,4	[3]	HgCl (газ)	36,19	[3]	MgCl ₂	71,30	[3]
Cu ₂ Se	88,7	[3]	HgCl ₂	(76,90)	[3]	MgCl ₂ ·H ₂ O	115,0	[3]
D ₂ O	84,35	[3]	HgCl ₂ (газ)	58,20	[2]	MgCr ₂ O ₄	126,8	[3]
D ₂ O (газ)	34,27	[3]	HgI ₂	77,40	[3]	MgF ₂	61,59	[3]
F ₂ O	43,30	[3]	HgI ₂ (газ)	61,09	[2]	MgFe ₂ O ₄	143,7	[3]
Fe ₃ C	106,0	[3]	HgO	44,05	[3]	Mg ₂ N ₃	104,6	[3]
Fe ₃ C	107,1	[3]	HgS	(50,17)	[2]	MgO	37,78	[3]
FeCO ₃	82,13	[3]	Hg ₂ SO ₄	132,0	[3]	MgO (газ)	32,97	[2]
Fe(CO) ₅	174	[3]	IBr (газ)	36,48	[3]	Mg(OH) ₂	76,99	[3]
FeCl ₂	76,33	[3]	ICl (газ)	36,56	[3]	Mg(OH) ₂	74,27	[2]
FeCl ₃	94,93	[3]	IF (газ)	33,47	[3]	MgSO ₄	96,48	[3]
FeCo ₂ O ₄	143,4	[3]	IF ₅ (газ)	99,16	[3]	MgSiO ₃	81,84	[3]
FeCr ₂ O ₄	133,4	[3]	IrO ₂	57,32	[3]	Mg ₂ SiO ₄	118,0	[3]
FeF ₂	68,12	[3]	KBH ₄	96,57	[3]	MgTiO ₃	91,76	[3]
Fe ₂ N	(70,0)	[2]	KBO ₂	(68,45)	[2]	Mn ₂ C	93,55	[3]
FeO	52,01	[3]	KBr	52,51	[3]	MnCO ₃	81,50	[3]
Fe ₂ O ₃	103,7	[3]	KBr (газ)	36,31	[2]	MnCl ₂	72,87	[3]
Fe ₂ O ₄	143,4	[3]	KBrO ₃	104,9	[3]	MnF ₂	67,94	[3]
Fe ₃ O ₄	151,6	[10]	KCl	51,46	[3]	Mn ₂ N ₂	121,3	[3]
FeS	54,64	[3]	KCl (газ)	36,28	[2]	MnO	44,10	[3]
FeS ₂	61,92	[3]	KClO ₃	100,2	[3]	MnO ₂	54,02	[3]
FeSi	50,21	[3]	KClO ₄	110,2	[3]	Mn ₂ O ₃	98,74	[3]
Fe ₂ SiO ₄	132,8	[3]	K ₂ CrO ₄	146,0	[3]	Mn ₂ O ₃	107,7	[12]
FeTiO ₃	99,50	[3]	KF	50,00	[3]	Mn ₂ O ₄	139,7	[3]
Ga ₂ O ₃	91,84	[3]	KH (газ)	30,84	[2]	Mn ₂ O ₄	148,1	[3]
GeBr ₄	101,8	[2]	KH ₂ AsO ₄	126,7	[3]	MnS	49,96	[3]
GeF ₄	81,88	[3]	KHF ₂	76,82	[3]	MnSO ₄	100,5	[3]
GeH ₄	44,35	[2]	KH ₂ PO ₄	117,0	[3]	MnSe	51,04	[3]
GeH ₃ Cl	54,77	[3]	KI	(53,22)	[3]	MnSiO ₃	86,44	[3]
GeI ₄	104,2	[3]	KI (газ)	36,74	[2]	MnTe	72,8	[3]
H ₃ BO ₃	81,31	[3]	KIO ₃	106,4	[3]	Mo(CO) ₆	219,0	[3]
HBr (газ)	29,12	[3]	KLi (газ)	36,74	[2]	Mo(CO) ₆	242,3	[13]
HCN	71,00	[3]	KMnO ₄	119,2	[3]	Mo ₂ N	64,02	[3]
HCN (газ)	36,01*	[3]	KNO ₃	96,32	[3]	MoC ₂	55,98	[3]
HCl (газ)	29,12	[3]	KO ₂	77,53	[3]	MoC ₃	73,64	[3]
HF (газ)	29,14	[3]	KReO ₃	122,6	[3]	MoS ₂	63,47	[3]
HI (газ)	29,12	[3]	K ₂ SO ₄	129,9	[3]	MoSi ₂	64,85	[3]
HN ₃ (газ)	43,69	[3]	La ₂ O ₃	107,9	[3]	Mo ₃ Si	92,97	[3]
HNO ₂ (газ)	45,81	[3]	LiAlO ₂	67,78	[3]	NH ₃ (газ)	35,52	[3]
HNO ₃	109,8	[3]	LiBr	(51,88)	[3]	N ₂ H ₄ (газ)	52,7	[3]
HNO ₃ (газ)	53,56	[3]	LiBr (газ)	33,85	[3]	NH ₄ Cl	89,29	[3]
HNO ₃ ·H ₂ O	182,5	[3]	Li ₂ CO ₃	97,40	[3]	NH ₄ Cl	84,1	[3]
H ₂ O	75,15	[3]	LiCl	(50,25)	[3]	NH ₄ F	65,27	[3]
H ₂ O (газ)	33,56	[3]	LiCl (газ)	33,0	[3]	(NH ₄) ₂ AsO ₄	151,2	[3]
H ₂ O ₂	89,33	[3]	LiF	41,90	[3]	(NH ₄) ₂ PO ₄	142,3	[3]
H ₂ O ₂ (газ)	43,14	[3]	LiF (газ)	33,2	[3]	(NH ₄)HSO ₄	142,9	[3]
HOCl (газ)	37,20	[3]	LiFeO ₂	82,89	[3]	(NH ₄)NO ₃	139,3	[3]
H ₃ PO ₄	106,1	[3]	LiH (газ)	29,58	[2]	(NH ₄) ₂ O	235,8	[3]
HS (газ)	32,32	[3]	LiI	54,68	[3]	(NH ₄)OH	154,9	[3]
H ₂ S (газ)	34,22	[3]	Li ₃ N	77,74	[3]	(NH ₄) ₂ SO ₄	187,5	[3]
H ₂ SO ₄	138,9	[3]	LiNO ₃	89,12	[3]	(NH ₄)VO ₃	129,3	[3]
H ₂ SO ₄ ·H ₂ O	215,1	[3]	Li ₂ O	54,09	[3]	NO (газ)	29,83	[3]
H ₂ Se (газ)	34,56	[3]	LiOH	49,58	[3]	NO ₂ (газ)	37,91	[2]
H ₂ Te (газ)	35,56	[3]	LiOH	40,52	[11]	N ₂ O (газ)	38,71	[3]
HfCl ₄	120,5	[3]	LiOH·H ₂ O	79,50	[3]	N ₂ O ₄	78,99	[3]
HfO ₂	60,25	[3]	Li ₂ TiO ₃	111,0	[3]	N ₂ O ₅	143,1	[3]

* При T = 300°K.

Вещество	C_p , дж/(моль·град)	Литература	Вещество	C_p , дж/(моль·град)	Литература	Вещество	C_p , дж/(моль·град)	Литература
NOCl	39,37	[2]	PbO ₂	64,43	[3]	SrSO ₄	101,7*	[3]
NO ₂ Cl	53,14	[3]	Pb ₂ O ₃	107,7	[3]	SrTiO ₃	98,37	[3]
NOF	41,34	[3]	Pb ₃ O ₄	147,0	[3]	T ₂ O (газ)	34,95	[3]
NaAlO ₂	73,30	[3]	PbS	49,9	[3]	TaC	36,78	[3]
NaBH ₄	86,48	[3]	PbS (газ)	35,02	[2]	TaN	42,09	[2]
NaBO ₂	65,94	[3]	PbSO ₄	104,3	[3]	Ta ₂ O ₅	135,1	[3]
NaBr	52,30	[3]	PbO	(31,51)	[2]	TeCl ₄	138,5	[3]
NaBr (газ)	35,98	[2]	PbSb	45,65	[2]	TeF ₆ (газ)	116,9	[3]
Na ₂ CO ₃	110,5	[3]	PtS	(50,17)	[2]	TeO ₂ (газ)	31,84	[2]
NaCl	50,79	[3]	PtSb ₂	70,21	[3]	ThF ₄	110,7	[3]
NaCl (газ)	35,44	[2]	RbBr	(51,71)	[2]	Th ₃ N ₄	155,9	[2]
NaClO ₃	100,8	[3]	RbCl	(51,21)	[2]	ThO ₂	62,34	[2]
NaF	46,82	[3]	RbClO ₃	103,2	[3]	TiB ₂	44,52	[3]
NaH (газ)	30,12	[2]	RbF	(50,67)	[2]	TiC	33,51	[3]
NaHCO ₃	87,70	[3]	RbLi	36,90	[2]	TiCl (газ)	34,7	[3]
NaI	54,31	[3]	Rb ₂ O ₇	166,2	[3]	TiCl ₂ (газ)	51,5	[3]
NaI (газ)	36,23	[2]	RhO	47,82	[2]	TiCl ₃ (газ)	72,4	[3]
NaNH ₂	66,15	[3]	Rh ₂ O	73,30	[2]	TiCl ₄ (газ)	95,47	[3]
NaNO ₃	93,05	[2]	Rh ₂ O ₃	104,0	[2]	TiN	37,11	[3]
Na ₂ O	72,13	[3]	SF ₆ (газ)	96,26	[2]	TiO	39,96	[3]
Na ₂ O ₂	71,43	[3]	SO (газ)	30,26	[3]	Ti ₂ O ₃	97,36	[3]
NaOH	89,33	[3]	SO ₂ (газ)	39,87	[3]	Ti ₃ O ₅	185,2	[3]
Na ₂ SO ₃	59,45	[3]	SO ₃ (газ)	50,63	[3]	Ti ₂ O ₅	154,8	[3]
Na ₂ SO ₄	120,1	[3]	SOCl ₂ (газ)	66,69	[2]	TiS ₂	67,91	[3]
Na ₂ SiO ₃	130,8	[3]	SOF ₂ (газ)	56,82	[3]	TiBr	52,72	[2]
Na ₂ TiO ₃	127,1	[3]	SbCl ₃ (газ)	77,4	[2]	TiBr (газ)	36,84	[2]
NbN	111,8	[3]	Sb ₂ O ₃	101,4	[3]	TiCl	50,92	[3]
NbO ₂	131,2	[3]	Sb ₂ O ₄	114,6	[3]	TiCl (газ)	39,23	[3]
Nb ₂ O ₅	43,35	[2]	Sb ₂ O ₅	117,7	[3]	TiF (газ)	34,60	[2]
Nd ₂ O ₃	57,49	[3]	Sb ₂ S ₃	(117,7)	[2]	TiNO ₃	99,37	[3]
Ni (CO) ₄ (газ)	132,1	[3]	Sc ₂ O ₃	104,1	[5]	UCl ₃	91,50	[3]
NiCl ₂	111,3	[3]	SeF ₆ (газ)	110,0	[2]	UCl ₄	123,4	[3]
NiF ₂	136,0	[3]	SeO (газ)	31,17	[2]	UF ₄	117,6	[3]
NiF ₂ O ₄	71,67	[3]	SiBr ₄ (газ)	97,07	[2]	UF ₆	166,75	[3]
NiO	64,06	[3]	SiC	26,65	[2]	UH ₃	49,29	[3]
NiS	145,6	[3]	SiCl ₄ (газ)	90,58	[2]	UO ₂	63,71	[3]
NiSO ₄	44,31	[3]	SiF ₄ (газ)	73,47	[2]	UO ₃	81,63	[3]
NiTe	54,68	[3]	SiH ₄ (газ)	42,76	[3]	U ₃ O ₈	237,9	[3]
NpO ₂	(138,3)	[2]	Si ₃ N ₄	99,87	[3]	UOCl ₂	95,06	[3]
OsO ₄ (газ)	52,51	[3]	SnAu	49,41	[3]	UO ₂ F ₂	103,2	[3]
PBr ₃ (газ)	66,19	[3]	SnBr ₄ (газ)	103,4	[2]	VC	33,35	[3]
PCl ₃ (газ)	57,57	[3]	SnCO ₂	78,87	[3]	VCl ₂	72,22	[3]
PCl ₅ (газ)	76,15	[3]	SnCl ₂	(79,33)	[2]	VCl ₃	93,18	[3]
PF ₃ (газ)	72,05	[3]	SnCl ₄ (газ)	98,45	[2]	VN	38,03	[3]
PH ₃ (газ)	111,9	[3]	SnNi ₃	99,66	[3]	VO	45,44	[3]
PN (газ)	56,02	[3]	SnO	44,31	[2]	V ₂ O ₃	103,9	[3]
P ₃ N ₅	37,11	[3]	SnO (газ)	31,71	[2]	V ₂ O ₄	118,0	[3]
POCl ₃ (газ)	29,66	[3]	SnO ₂	52,59	[3]	V ₂ O ₅	137,4	[3]
P ₄ O ₁₀	149,2	[5]	SnPt	49,87	[3]	WC	36,11	[5]
PbBr ₂	84,39	[3]	SnS	49,25	[3]	WO ₃	81,50	[3]
PbCl ₂	204,8	[3]	SnS (газ)	34,43	[2]	Y ₂ O ₃	102,5	[3]
PbCO ₃	80,12	[3]	SnS ₂	74,31	[3]	ZnCO ₃	80,17	[3]
PbF ₂	76,78	[3]	SnTe ₂	70,13	[14]	ZnCl ₂	(76,27)	[3]
PbI ₂	87,40	[3]	SrBr ₂	73,22	[3]	ZnF ₂	65,65	[3]
PbO (желтая)	(73,7)	[2]	SrCl ₂	(79,62)	[3]	ZnFe ₂ O ₄	138,0	[3]
PbO (газ)	81,17	[3]	SrCO ₃	(79,20)	[2]	Zn ₂ Mg	74,06	[2]
	49,33	[3]	SrO	81,42	[3]	ZnO	40,25	[2]
	45,81	[3]		44,50	[3]	ZnO (газ)	31,71	[2]
	32,43	[3]		33,14	[2]	ZnS	46,02	[3]

* При T = 300°K.

Вещество	C_p , дж/(моль·град)	Литература	Вещество	C_p , дж/(моль·град)	Литература	Вещество	C_p , дж/(моль·град)	Литература
ZnSO ₄	97,37	[2]	ZrCl ₄	119,9	[3]	ZrO ₂	55,81	[3]
Zn ₂ SiO ₄	123,3	[3]	ZrN	40,1	[3]	ZrSiO ₄	98,62	[3]
Zn ₂ TiO ₄	137,3	[3]	Zr ₃ N ₂	123,0	[3]			

Таблица 10.3

Теплоемкость органических соединений при давлении 760 мм рт. ст. и температуре 298,15°K [3,15]

Формула	Название	C_p , дж/(моль·град)	
		Конден- сат	Газ
CH ₄	Метан	—	35,79
CH ₃ F	Фторметан	—	37,40
CH ₃ Cl	Хлорметан	—	40,71
CH ₃ Br	Бромметан	—	42,43
CH ₃ I	Иодметан	—	44,10
CH ₂ F ₂	Дифторметан	—	42,97
CH ₂ ClF	Фторхлорметан	—	47,07
CH ₂ Cl ₂	Дихлорметан	—	51,13
CH ₂ Br ₂	Дибромметан	—	54,79
CHF ₃	Трифторметан (фреон-23)	93,10	51,09
CHF ₂ Cl	Дифторхлорметан (фреон-22)	104,06	55,86
CH ₂ Cl ₂	Фтордихлорметан (фреон-21)	107,10	60,96
CHCl ₃	Трихлорметан	—	65,40
CHBr ₃	Трибромметан	—	71,09
CF ₄	Тетрафторметан (фреон-14)	—	61,21
CF ₃ Cl	Трифторхлорметан (фреон-13)	—	66,82
CF ₃ Br	Трифторбромметан	—	84,43
CF ₂ Cl ₂	Дифтордихлорметан (фреон-12)	126,0	87,85
CF ₂ ClBr	Дифторхлорбромметан	—	74,56
CF ₂ Br ₂	Дифтордибромметан (фреон-12B2)	—	76,99
CFCI ₃	Фтортрихлорметан (фреон-11)	121,5	77,88
CFBr ₃	Фтортрибромметан (фреон-13B1)	214,09	84,43
CCl ₄	Углерод четыреххлористый	131,67	83,42
CBBr ₄	Тетрабромметан	—	91,21
CH ₃ O	Метанол	81,6	43,89
CH ₂ O	Формальдегид	—	35,35
CH ₂ O ₂	Муравьиная кислота	99,04	48,69
COCl ₂	Фосген	—	60,67
CH ₄ S	Метантиоль	—	50,69
CH ₃ N	Метиламин	—	51,71
C ₂ H ₆	Этан	—	52,70

Продолжение табл. 10.3

Формула	Название	C_p , дж/(моль·град)	
		Конден- сат	Газ
C ₂ H ₄	Этен (этилен)	—	43,63
C ₂ H ₂	Этин (ацетилен)	—	43,93
C ₂ H ₅ F	Фторэтан	—	58,99
C ₂ H ₅ Cl	Хлорэтан	—	62,80
C ₂ H ₅ Cl	Хлорэтан	—	53,66
C ₂ H ₄ Cl ₂	1,1-Дихлорэтан	126,3	76,23
C ₂ H ₄ Cl ₂	1,2-Дихлорэтан	129,0	79,50
C ₂ H ₄ Br ₂	1,2-Дибромметан	136,0	—
C ₂ H ₂ Cl ₂	1,1-Дихлорэтен	111,3	67,03
C ₂ H ₃ Cl ₃	1,1,2-Трихлорэтан	144,3	88,99
C ₂ F ₃ Cl ₃	1,2,2-трифтор-1,1,2-трихлорэтан (фреон-113)	178,56	116,1
C ₂ H ₆ O	Этанол	111,4	73,60
C ₂ H ₄ O	Ацетальдегид	—	54,64
C ₂ H ₄ O	Этилена окись	151	48,28
C ₂ H ₂ O	Кетен	—	47,82
C ₂ H ₄ O ₂	Уксусная кислота, мономер	123,4	66,53
C ₂ H ₆ S	Уксусная кислота, димер	—	146,4
C ₂ H ₅ O ₂ N	Этангидроль	117,8	72,68
C ₃ H ₈	Глицин	100,3	—
C ₃ H ₈	Пропан	—	73,51
C ₃ H ₆	Пропен (пропилен)	—	63,89
C ₃ H ₆	Циклопропан	—	55,94
C ₃ H ₄	Пропадие (аллен)	—	58,99
C ₃ H ₄	Пропин (метилацетилен)	—	60,67
C ₃ H ₇ Cl	2-Хлорпропан	—	87,57
C ₃ H ₈ O	Пропанол	153,4	—
C ₃ H ₆ O	Ацетон	125	74,89
C ₄ H ₁₀	Бутан	—	98,78
C ₄ H ₁₀	2-Метилпропан (изобутан)	—	96,82
C ₄ H ₈	1-Бутен	—	89,33
C ₄ H ₈	цис-2-Бутен	—	78,91
C ₄ H ₈	транс-2-Бутен	—	87,82
C ₄ H ₈	2-Метилпропен (изобутилен)	—	89,11
C ₄ H ₈	Циклобутан	—	72,22
C ₄ H ₆	1,2-Бутадиен	—	80,12
C ₄ H ₆	1,3-Бутадиен (дивинил)	—	79,54
C ₄ H ₆	1-Бутин (бутилен)	—	81,42
C ₄ H ₆	2-Бутин	125,1	77,95

Формула	Название	Ср. дж/(моль·град)		Формула	Название	Ср. дж/(моль·град)	
		Конден- сат	Газ			Конденсат	Газ
C_4H_6	Циклобутен	—	67,07	C_5H_8	2-Метил-1,3-бутадиен (изопрен)	154,6	104,6
$C_4H_{10}O$	Бутанол	179	—	C_5H_8	2-Метил-1,2-бутадиен	—	105,4
C_4H_8O	2-Бутанон	162	—	C_5H_8	1-Пентин	—	106,7
$C_4H_8O_2$	Уксусноэтиловый эфир	170	—	C_5H_8	2-Пентин	—	98,7
$C_4H_6O_2$	Диоксан	152,9	—	C_5H_8	3-Метил-1-бутин	—	104,7
C_4H_4O	Фуран	114,6	64,44	C_5H_8	Циклопентен	122,4	75,10
C_5H_{12}	n-Пентан	171,5	122,6	$C_5H_{12}O$	Пентанол	209	—
C_5H_{12}	2-Метилбутан (изопен- тан)	164,9	120,6	C_6H_{14}	Гексан	195,0	146,7
C_5H_{12}	2,2-Диметилпропан (нео- пентан)	—	121,6	C_6H_{12}	1-Гексен	183,3	138,4
C_5H_{10}	1-Пентен	155,3	114,6	C_6H_{12}	Циклогексан	156,5	106,3
C_5H_{10}	цис-2-Пентен	151,7	101,8	C_6H_{12}	Метилциклопентан	158,7	109,8
C_5H_{10}	транс-2-Пентен	157,0	112,1	C_6H_{10}	1-Гексин	—	130,5
C_5H_{10}	2-Метил-1-бутен	157,2	111,6	C_6H_{10}	Циклогексен	140,2	105,0
C_5H_{10}	3-Метил-1-бутен	156,1	118,6	C_6H_6	Бензол	136,1	81,64
C_5H_{10}	2-Метил-2-бутен	152,8	106,6	C_6H_5F	Фторбензол	146,4	94,43
C_5H_{10}	Циклопентан	156,1	82,93	C_6H_5Cl	Хлорбензол	150,1	97,07
C_5H_8	1,2-Пентадиен	149,0	105,4	C_6H_5Br	Бромбензол	155,4	—
C_5H_8	1-цис-3-Пентадиен	—	94,6	C_6H_5O	Гексанол	238	—
C_5H_8	1-транс-3-Пентадиен	—	103,3	C_6H_6O	Фенол	134,7	—
C_5H_8	1,4-Пентадиен	—	105,0	C_6H_7N	Анилин	191	—
C_5H_8	2,3-Пентадиен	—	101,3	$C_6H_5O_2N$	Нитробензол	187,3	—

10.2. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ НОРМАЛЬНОМ ДАВЛЕНИИ

Таблица 10.4

Теплоемкость элементов при температуре ниже 20°K и давлении 760 мм рт. ст.

Вещество	T, °K	Ср. кал/(кг·град)	Вещество	T, °K	Ср. кал/(кг·град)
Ag [16]	1	0,0017	Bi [16]	1	0,0014
	2	0,0057		2	0,0110
	4	0,0296		4	0,1180
	6	0,093		6	0,511
	10	0,4302		10	2,49
Al [3, 17]	2	0,0285	Br [17]	10	9,3
	4	0,0679		10	1,1
	10	0,3970		1	0,029
Ar [16]	2	0,117	Cd [16]	6	1,30
	4	1,042		10	8,0
	6	4,140		10	4,5
	8	10,60		10	0,2
As [17]	10	19,8	Cl ₂ [17]	10	0,2
	10	0,4		10	0,2
	1	0,0014		10	0,2
Au [16]	2	0,0060	Cr [17]	10	1,1
	4	0,0382		10	1,0
	6	0,1200		4	360
	10	0,526		6	237
Be [16]	1	0,0060	Cu [17]	8	254
	2	0,0122		10	352
	4	0,0261		12	520
	6	0,0430		13,95	731
	10	0,0951		4	19,1
			H ₂ (нормальный) [3]	6	65,7
			H ₂ (параводород) [13]		

Вещество	$T, ^\circ K$	$C_p,$ кал/(кг·град)	Вещество	$T, ^\circ K$	$C_p,$ кал/(кг·град)
H_2 (параводород) [13]	8	156	α -Мп [17]	10	0,2
	10	294	Мо [17]	10	0,1
	12	480	N_2 [17]	10	37,9
	13,88	698	Na [16]	1	0,019
D_2 (нормальный) [14]	12	245		2	0,069
	14	348		4	0,383
	16	475		6	1,22
	18,65	693		10	5,69
^4He [3]	0,5	0,723	Nb [16]	1	0,21
	1,0	26,6		6	0,184
	1,2	77,7		10	0,526
	1,5	269	Ne [17]	10	1,385
	1,8	683	Ni [17]	10	0,2
	2,0	1190	O_2 [17]	10	19
	2,1	1640	Pb [17]	10	3,2
	2,2	1160	Pt [17]	10	0,3
	2,4	598	Rb [16]	1	0,048
	2,7	547		6	0,32
	3,4	702		10	0,65
	4,21	1050	S (ромбическая) [17]	10	3,1
	0,1	127	Sb [17]	10	0,5
	0,5	255	Se [17]	10	23
^3He [3]	1,0	343	Si [17]	10	0,2
	2,0	598	Sm [17]	10	4,7
Hf [16]	10	0,14	Sn [16]	1	0,017
Hg (сверхпроводящая) [16]	1	0,007		6	1,27
	2	0,115		10	8,1
	4	0,997	Ta [16]	1	0,008
				4	0,041
Hg [16]	1	0,008		6	0,079
	2	0,115		10	0,280
	4	0,978	Te [17]	10	1,6
	6	2,61	Ti [16]	1	0,017
In [16]	10	5,62		4	0,076
	1	0,007		6	0,129
	6	0,858		10	0,301
	10	3,71	Tl [17]	10	4,0
I_2 [17]	10	3,7	V [17]	10	0,2
K [17]	10	13	W [17]	10	0,1
Kr [17]	10	16,9	Xe [17]	10	14,8
Li [17]	10	4	Zr [17]	10	0,8
Mg [17]	10	0,4			

Теплоемкость C_p , дж/(моль·град), элементов при температуре выше 20°K и давлении 760 мм рт. ст.
 Часть строки правее * относится к газовой фазе.

Вещество	Температура, °K									Литература
	20	40	80	150	250	400	600	1000	1500	
As	—	—	—	—	—	28,0	29,7	33,1	—	[1]
Ag	1,72	8,39	17,89	22,97	25,06	25,9	27,1	29,8	31,4	[1, 3]
Al	0,23	2,09	9,65	18,52	23,25	25,61	28,12	29,3	—	[3, 2]
Ar	11,76	22,09	32,13	—	—	—	—	—	—	[3]
As	—	—	13,47	20,67	24,10	25,6	27,4	—	—	[1, 3]
As ₂	—	—	—	—	—	*35,94	36,74	37,15	37,28	[1]
At	—	—	—	—	—	—	83,7	—	—	[1]
At ₂	—	—	—	—	—	*37,5	37,7	38,0	38,2	[1]
Au	3,21	11,20	19,63	23,49	24,92	25,77	26,78	28,87	29,3	[2, 3]
B (кристалл)	—	—	0,54	3,23	8,82	—	—	—	—	[3]
B (аморфный)	—	—	0,75	3,60	9,49	13,8	17,5	25,0	—	[2, 3]
Ba	—	—	—	—	—	27,78	30,54	31,38	31,38	[1]
Be	0,014	0,090	0,816	5,73	13,85	19,84	23,43	27,32	32,4	[1, 3]
Bi	—	—	21,38	24,39	25,36	27,82	31,4	—	—	[3]
Bг	12,72	29,00	40,52	49,20	59,25	—	—	—	—	[3]
Br ₂	—	—	—	—	—	*36,7	37,3	37,7	38,0	[3]
C (графит)	0,1	0,35	1,17	3,299	6,816	11,93	16,86	21,51	24,10	[3]
C (алмаз)	0,004	0,01	0,110	1,000	4,135	9,95	15,85	21,04	—	[3]
Ca	1,59	7,78	17,11	29,97	25,65	27,4	30,6	39,7	—	[3]
Cd	5,19	13,21	20,61	24,04	25,51	27,15	29,7	29,7	—	[2, 3]
Ce	13,31	24,52	26,23	26,84	—	31,6	33,9	40,6	—	[1, 3]
Cl	7,74	23,97	38,62	50,96	—	—	—	—	—	[3]
Cl ₂	—	—	—	—	—	*35,3	36,6	37,5	38,0	[3]
Co	0,28	2,38	10,83	19,50	23,93	26,6	30,0	37,2	40,2	[1, 3]
Cr	—	—	6,61	16,53	22,05	26,07	29,37	33,93	39,07	[2, 3]
Cs	19,75	23,77	25,27	26,82	29,08	31,8	31,8	—	—	[1, 3]
Cs ₂	—	—	—	—	—	*38,39	38,91	39,87	41,13	[3]
Cu	0,48	3,77	12,93	20,52	23,93	25,15	26,40	28,91	31,4	[2, 3]
Dy	5,59	18,69	32,66	45,51	28,15	—	—	—	—	[3]
Er	21,00	24,00	32,53	25,97	27,58	—	—	—	—	[3]
F	12,99	36,73	57,71	—	—	—	—	—	—	[3]
F ₂	—	—	—	—	—	*33,01	35,18	37,01	37,94	[3]
α-Fe	0,22	1,54	8,62	18,12	23,56	27,41	31,55	57,74	43,29	[3]
Ga	2,13	7,57	16,57	21,99	24,91	27,8	27,8	—	—	[1, 3]
Gd	4,16	15,20	26,51	32,69	41,64	29,13	30,7	33,5	37,0	[1, 3]
Ge	0,939	4,49	11,14	18,64	—	24,9	26,4	28,3	29,3	[1, 3]
H ₂	—	—	—	—	—	*29,18	29,32	30,20	32,27	[3]
D ₂	—	—	—	—	—	*29,23	29,63	31,66	34,24	[3]
T ₂	—	—	—	—	—	*29,32	30,11	32,76	35,25	[3]
Hf	1,69	9,14	19,18	23,72	—	26,0	27,0	29,0	31,5	[1, 3]
Hg	10,3	17,94	33,16	25,92	28,32	27,36	27,15	—	—	[3]
Ho	10,25	20,43	34,02	26,56	26,82	—	—	—	—	[3]
In	7,088	16,13	22,12	25,12	26,32	28,9	29,7	29,7	29,7	[1, 3]
Ir	0,39	4,33	14,43	21,52	24,57	25,65	26,82	29,20	32,17	[2, 3]
I	16,18	31,62	43,32	49,52	53,25	—	—	—	—	[3]
I ₂	—	—	—	—	—	*37,2	37,6	37,9	38,2	[3]
K	9,81	18,80	23,79	26,00	28,02	31,51	30,12	30,38	—	[3]
K ₂	—	—	—	—	—	*38,16	38,62	39,46	41,7	[3]
Kr	15,36	23,64	28,53	—	—	—	—	—	—	[3]
La	6,19	15,69	22,34	25,25	—	28,5	29,8	—	—	[3]
Li	0,40	2,40	9,71	17,82	22,43	27,61	29,56	28,84	—	[3]
Li ₂	—	—	—	—	—	*26,92	37,74	38,58	39,37	[3]
Mg	0,36	3,36	12,47	20,40	23,93	26,3	28,6	—	—	[3]
α-Mn	—	—	11,72	20,00	24,96	28,53	31,92	37,82	—	[3]
γ-Mn	—	—	11,42	20,44	25,69	—	—	—	—	[3]
Mo	0,21	1,96	10,01	18,91	23,10	25,0	26,3	28,0	32,0	[1, 3]
N ₂	19,87	37,78	45,61	—	—	*29,25	30,11	32,70	34,85	[3]
Na	—	—	20,71	24,52	26,90	31,46	29,71	29,00	—	[3]
Na ₂	—	—	—	—	—	*37,82	38,28	38,99	39,79	[3]
Nb	—	—	—	—	—	25,27	26,11	27,70	29,71	[2]
Nd	7,36	17,24	25,69	28,10	—	—	—	—	—	[3]
Ne	18,03	—	—	—	—	—	—	—	—	[3]

Вещество	Температура, °K									Литература
	20	40	80	150	250	400	600	1000	1500	
Ni	0,34	2,23	10,18	19,30	24,40	28,79	34,64	32,64	36,40	[2, 3]
O ₂	13,97	41,51	53,76	—	—	*30,10	32,09	34,87	36,56	[3]
O ₃	—	—	—	—	—	*43,68	49,76	54,55	—	[3]
Os	—	—	—	—	—	25,27	26,02	27,49	29,33	[2]
P (кристалл)	—	—	—	—	—	26,36	29,62	—	—	[2]
P ₂	—	—	—	—	—	*33,6	35,5	36,8	37,4	[1]
Pb	11,01	19,57	23,69	25,27	26,36	27,45	29,37	29,41	—	[3]
Pd	0,97	5,42	15,01	22,13	25,31	26,57	27,74	30,04	32,93	[2, 3]
Pr	10,25	18,28	25,73	28,33	—	—	—	—	—	[3]
Pf	1,51	7,45	17,15	23,10	25,76	26,28	27,36	29,62	32,43	[2, 3]
Rb	—	22,38	24,98	26,57	28,70	—	—	—	—	[3]
Rb ₂	—	—	—	—	—	*38,12	38,49	39,25	40,17	[3]
Re	0,61	4,80	14,93	22,30	25,40	25,86	26,94	26,12	31,84	[1, 3]
Rh	0,28	2,74	11,79	20,17	24,05	26,40	28,16	31,59	35,90	[2, 3]
Ru	0,17	1,88	10,04	18,91	23,93	24,84	25,73	28,24	30,12	[2, 3]
S (ромбическая)	2,57	6,08	10,90	16,62	21,31	—	—	—	—	[3]
S (моноклиническая)	2,57	6,08	10,98	16,96	22,14	—	—	—	—	[3]
S ₂	—	—	—	—	—	*34,06	35,73	36,99	37,49	[3]
Sb	3,20	10,13	18,54	23,22	24,90	25,9	27,4	—	—	[3]
Sb ₂	—	—	—	—	—	*36,8	37,1	37,3	37,4	[1]
Se	3,43	8,70	15,98	21,69	24,28	—	—	—	—	[2, 3]
Se ₂	—	—	—	—	—	*36,23	36,86	37,20	37,28	[2]
Si	—	—	5,19	12,01	18,24	22,3	24,4	26,1	—	[3]
Sm	7,23	18,28	32,21	26,29	28,22	—	—	—	—	[3]
Sn (белое)	—	12,80	20,50	24,48	26,11	29,04	30,54	30,54	—	[2, 3]
Sn (серое)	3,85	9,08	17,03	22,76	25,40	29,04	30,54	30,54	—	[2, 3]
Ta	1,36	7,61	17,26	22,68	24,88	26,2	27,0	27,9	28,9	[1, 3]
Tb	4,47	16,94	28,91	37,3	31,59	—	—	—	—	[3]
Te	4,52	11,76	19,79	23,74	25,14	26,3	27,6	—	—	[2, 3]
Th	4,63	14,04	21,47	24,96	26,74	29,29	33,05	40,67	50,17	[1, 3]
Ti	0,33	2,47	10,88	19,54	24,04	26,61	28,62	31,25	—	[1, 3]
Tl	10,29	18,95	23,71	25,27	26,07	27,78	31,38	—	—	[3]
U	3,38	12,33	20,54	24,67	26,93	29,6	34,5	42,5	38,3	[1, 3]
V	—	—	10,17	19,29	23,56	26,1	27,5	30,5	36,6	[1, 3]
W	0,33	3,29	12,80	20,53	23,69	25,1	25,8	27,2	26,9	[1, 3]
Xe	16,86	23,93	26,87	33,57	—	—	—	—	—	[3]
Zn	1,76	8,06	16,87	22,70	24,84	26,40	28,41	31,3	—	[2, 3]
Zr	1,17	6,15	15,86	22,17	24,76	—	—	—	—	[3]

**10.3. ТЕПЛОЕМКОСТЬ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ
ПРИ НОРМАЛЬНОМ ДАВЛЕНИИ**

Таблица 10.6

Теплоемкость C_p , дж/(моль·град), неорганических соединений при температуре выше 20°K и давлении 760 мм рт. ст.

В скобках приведены расчетные значения. Часть строки правее * относится к газовой фазе.

Вещество	Температура, °K									Литера- тура
	20	40	80	150	250	400	600	1000	1500	
AgBr	—	28,28	42,59	48,87	51,88	58,95	71,84	*37,34	37,36	[2, 3]
AgCl	8,71	22,30	37,95	46,94	50,41	56,86	61,63	*37,24	37,28	[2, 3]
AgI	15,31	28,03	42,72	50,12	53,48	64,68	56,5	*37,36	37,38	[2, 3]
AgNO ₃	11,30	27,82	52,59	71,04	86,48	112,3	128	—	—	[2, 3]
Ag ₂ SO ₄	12,72	38,49	73,81	99,16	123,5	(144)	(167)	205	—	[2, 3]
AlBr	—	—	—	—	—	36,80	37,70	38,60	39,40	[3]
AlF ₃	—	—	17,20	42,76	67,40	84,56	97,11	100,1	—	[3]
Al ₂ O ₃ (сапфир)	0,08	0,71	6,95	31,97	66,90	—	—	—	—	[3]
Al ₂ O ₃ (корунд)	0,076	0,691	6,895	31,98	67,01	96,18	112,50	124,74	—	[3]
AsF ₃	11,40	29,12	48,24	68,58	90,71	*71,9	77,2	81,9	—	[2, 3]
AsH ₃	18,28	44,97	50,28	46,79	—	*45,4	53,1	63,8	75,7	[2, 3]
AuCl	—	—	—	—	—	*36,28	36,90	37,20	37,28	[2]
B ₂ C	—	—	2,68	14,73	41,13	77,19	97,29	114,3	128,1	[3]
BF ₃	12,3	29,29	47,20	103,05	—	*57,57	67,11	75,82	—	[3]
B ₂ H ₆	5,02	21,30	44,18	75,44	—	*71,71	98,91	135,1	156,9	[3]
BN	0,272	1,075	3,883	8,770	16,33	13,68	16,69	22,76	—	[2, 6]
BN	—	—	—	—	—	*30,63	32,61	34,31	36,99	[2]
B ₂ O ₃ (кристалл)	0,38	3,22	15,82	33,15	53,44	75,60	98,78	128	128	[3]
BaCO ₃	—	—	41,05	64,14	80,21	99,03	113,0	134,6	—	[3]
BaF ₂	2,51	12,47	35,19	58,49	69,64	75,56	84,10	101,2	—	[3]
BaO	—	—	26,78	39,66	46,02	49,86	53,60	56,82	—	[3]
BaSO ₄	5,48	21,76	49,25	12,38	93,97	119,4	131,6	137,9	—	[3]
BaTiO ₃	—	—	31,51	66,78	95,48	112,9	121,3	128,1	134,6	[3]
BeO	—	—	1,67	7,95	20,46	33,76	41,71	50,75	—	[3]
Bi ₂ O ₃	—	—	55,72	81,50	107,6	116,9	123,6	—	—	[3]
BrF ₃	9,46	25,90	46,40	69,87	90,83	*72,72	78,03	81,20	—	[3]
BrF	—	—	—	—	—	*35,52	36,15	37,32	37,95	[15]
CO	14,02	34,14	—	—	—	*29,34	30,44	33,19	35,23	[3]
CO ₂	5,13	19,62	35,91	47,72	—	*41,31	47,31	54,29	58,36	[3]
CO ₂ S	11,00	27,70	40,25	72,33	—	*45,81	51,09	56,44	59,29	[3]
CS ₂	11,97	27,82	41,09	55,64	75,27	*49,58	54,39	58,66	60,58	[3]
CaCO ₃ (кальцит)	—	—	31,80	55,56	75,23	97,11	110,5	123,8	—	[2, 3]
CaCl ₂	—	—	40,88	61,30	70,71	75,40	78,78	84,35	103,5	[3]
CaF ₂	—	—	20,00	46,19	62,93	73,22	78,66	90,49	123,7	[2, 3]
CaO	0,08	1,26	9,71	27,15	41,46	—	51,38	—	—	[3]
Ca(OH) ₂	0,92	5,69	22,84	53,56	79,37	98,41	107,0	115,3	—	[3]
CaSO ₄ ·2H ₂ O	4,27	20,38	63,35	115,5	167,8	110,5	130,3	159,8	—	[3]
CaTiO ₃	—	—	26,07	59,71	89,16	112,7	123,1	130,1	134,8	[3]
CdCl ₂	7,49	19,75	43,18	63,43	72,30	77,32	85,35	—	—	[3, 7]
CeO	—	—	—	—	—	66,9	69,0	73,2	78,5	[5]
Cl ₂ O	—	—	—	—	—	*49,0	53,1	56,1	57,3	[15]
ClO ₂	—	—	—	—	—	*45,86	51,13	55,61	57,49	[15]
ClF ₃	8,79	25,31	44,89	66,32	114,6	*71,34	71,19	80,83	82,13	[3, 15]
CoF ₂	3,28	9,43	25,78	48,03	64,06	—	—	—	—	[3]
Cr ₂ C ₂	0,84	3,43	20,92	56,40	88,37	113,7	127,9	147,3	—	[3]
CrF ₃	3,75	15,29	29,79	51,84	72,68	—	—	—	—	[3]
Cr ₂ O ₃	—	—	15,02	51,04	96,90	113,3	120,5	127,0	132,5	[3]
CuBr	5,61	19,50	36,11	46,78	52,79	*36,63	37,04	37,24	37,31	[2, 3]
CuO	0,59	3,51	12,38	26,12	39,11	46,82	50,84	58,87	—	[3, 9]
Cu ₂ O	5,23	18,95	36,65	47,53	59,40	71,88	76,65	86,19	—	[3, 9]
Cu ₂ S	—	—	42,93	61,92	73,55	97,28	97,28	85,02	—	[2]
F ₂ O	—	—	—	—	—	*47,61	52,43	55,86	57,11	[15]
Fe ₃ C	—	—	32,30	66,61	101,5	115,6	114,7	119,7	126,0	[3]
FeCl ₂	—	—	42,17	64,10	74,43	79,66	83,09	102,1	—	[3]
FeS	1,10	6,99	20,90	36,12	47,11	65,10	57,02	61,0	71,3	[3]
Fe ₂ O ₃	0,38	3,99	21,20	56,27	92,22	120,1	140,8	150,6	143,7	[3]
Fe ₃ O ₄	—	—	37,45	92,76	131,8	172,2	212,5	200,8	200,8	[3]
Ga ₂ O ₃	0,46	5,56	23,47	53,30	81,92	(91,42)	(112,5)	—	—	[2, 3]

Вещество	Температура, °К									Литература
	20	40	80	150	250	400	600	1000	1500	
GeF ₄	—	—	—	—	—	90,17	98,66	104,3	—	[3]
HBr	11,05	20,50	39,33	46,88	—	*29,21	29,87	32,33	34,74	[3]
HCN	3,494	12,48	28,52	42,32	60,84	*39,42	44,19	50,79	56,40	[3]
HCl	5,86	15,69	27,99	—	—	*29,16	29,71	31,76	—	[3]
HF	2,51	9,04	16,95	25,57	—	*29,15	29,23	30,17	32,23	[3]
HI	14,14	23,26	37,40	45,58	—	*29,29	30,12	32,34	35,27	[2, 3]
HN ₃	—	—	—	—	—	*49,12	57,36	67,45	73,98	[3]
HNO ₃	5,18	18,69	36,92	51,79	111,5	*63,4	—	—	—	[3]
HNO ₃ ·H ₂ O	5,14	19,70	43,39	66,40	180,7	—	—	—	—	[3]
H ₂ O	2,05	6,13	12,87	22,06	34,83	*34,24	36,29	41,20	46,98	[3]
D ₂ O	2,23	6,38	13,53	25,53	41,20	*35,62	38,82	45,41	51,12	[3]
H ₂ O ₂	1,23	6,90	20,48	35,30	51,46	*45,45	55,69	62,84	68,32	[3]
H ₂ S	5,23	14,90	30,59	56,32	—	*35,60	38,69	45,85	51,66	[3]
H ₂ SO ₄	7,24	21,84	39,37	59,79	88,58	—	—	—	—	[3]
H ₂ SO ₄ ·H ₂ O	5,56	24,24	45,15	73,97	113,1	—	—	—	—	[3]
H ₂ Se	—	—	37,7	54,85	—	*36,28	40,21	47,24	—	[3]
HfO ₂	—	—	17,82	36,40	54,39	67,15	73,93	80,00	85,19	[3]
HgCl	8,03	29,00	37,53	44,64	49,45	36,74	37,11	37,28	37,36	[2, 3]
HgO (красная)	5,44	15,02	25,52	31,40	41,45	—	—	—	—	[3]
IBr	—	—	—	—	—	*36,99	37,40	37,78	38,07	[15]
ICl	—	—	—	—	—	*36,40	37,11	37,66	37,99	[15]
KBr	6,94	23,18	39,92	47,94	50,88	53,93	56,69	62,26	—	[3]
KBr	—	—	—	—	—	*36,94	37,20	37,32	37,36	[2]
KCl	2,84	15,64	34,48	45,18	49,88	52,09	55,31	63,47	—	[2, 3]
KCl	—	—	—	—	—	*36,78	37,11	37,32	37,36	[2]
KF	1,16	7,92	25,48	40,71	47,70	51,34	53,93	59,16	—	[2, 3]
KH ₂ PO ₄	3,21	17,67	46,36	75,06	104,0	—	—	—	—	[3]
KMnO ₄	12,89	35,23	61,92	87,86	110,6	—	—	—	—	[3]
K ₂ SO ₄	—	—	68,24	98,86	120,5	149,1	175,2	196,7	200	[2, 3]
Li ₂ CO ₃	0,96	6,74	26,07	55,56	85,77	—	—	—	—	[3]
LiF	0,08	0,75	7,78	24,85	38,07	46,62	51,61	59,58	—	[3]
Li ₂ O	0,063	0,54	5,61	24,45	46,93	63,85	73,85	86,53	—	[3]
MgCO ₃	—	—	15,82	43,85	68,62	90,12	107,7	—	—	[2, 3]
MgCl ₂	—	—	31,34	55,44	68,13	76,07	80,25	—	—	[3]
MgF ₂	—	—	14,77	37,66	56,48	69,31	74,60	80,46	86,24	[3]
MgO	0,088	0,53	4,54	18,73	33,30	41,67	45,23	49,25	53,22	[2, 3]
Mg(OH) ₂	0,34	2,83	13,74	40,96	68,78	81,00	94,22	—	—	[2, 3]
Mn ₃ C	—	—	31,38	62,84	86,61	104,4	115,0	127,4	159,0	[3]
MnCl ₂	—	—	38,50	60,58	70,71	77,15	81,84	94,56	—	[3]
MnF ₂	4,97	17,02	29,65	49,08	64,10	—	—	—	—	[3]
MnO	—	—	21,80	33,14	41,51	47,45	50,33	54,14	58,49	[3]
Mn ₂ O ₃	—	—	41,84	61,84	93,72	109,0	120,8	137,2	—	[12]
MnS	—	—	33,14	49,16	48,95	50,71	52,22	55,23	58,99	[3]
MoO ₃	1,63	6,99	23,77	47,70	67,99	84,22	94,52	107,1	—	[3]
Mo ₂ Si	—	—	34,12	69,02	88,57	97,02	102,3	110,7	120,5	[3]
NF ₃	21,05	42,34	71,74	—	—	—	—	—	—	[3]
NH ₃	1,54	7,61	20,77	38,65	—	*38,53	44,73	56,2	66,2	[3]
N ₂ H ₄	1,46	8,91	24,96	42,03	59,75	*63,2	76,5	93,3	107	[3]
(NH ₄) ₂ H ₂ PO ₄	4,18	17,77	46,53	131,8	125,2	—	—	—	—	[3]
NO	7,03	17,28	30,21	—	—	*29,97	31,25	34,00	35,82	[3]
N ₂ O	6,32	21,46	37,45	51,46	—	*42,87	48,86	56,02	60,45	[3]
N ₂ O ₄	8,49	28,70	52,55	76,82	107,2	*90,50	103,6	122,1	—	[2, 3]
NaBH ₄	1,59	10,54	31,71	57,86	80,00	94,56	108,6	—	—	[3]
NaCl	1,42	10,04	29,37	44,10	48,86	52,47	55,73	62,26	—	[2, 3]
NaCl	—	—	—	—	—	*36,28	36,90	37,20	37,28	[2]
NaF	—	—	16,15	34,23	44,43	49,12	52,89	59,62	68,62	[3]
NaNO ₃	3,77	17,32	43,56	66,02	84,22	116,1	155,6	—	—	[1, 3]
NaOH	—	—	20,67	41,30	54,44	65,10	86,06	83,72	—	[3]
Na ₂ SO ₄	2,43	17,06	53,39	89,70	117,6	153,4	170,2	202,5	197,4	[3]
Na ₂ SiO ₃	—	—	36,15	73,26	102,2	130,6	148,0	168,9	179,1	[3]
Na ₂ TiO ₃	—	—	34,64	78,16	114,4	140,0	151,3	179,7	196	[3]
NiCl ₂	3,29	13,08	35,19	57,66	69,04	75,40	79,79	85,94	100,4	[3]

Вещество	Температура, °К									Литература
	20	40	80	150	250	400	600	1000	1500	
NiO	—	—	9,25	24,89	39,41	52,13	51,84	52,23	59,45	[3, 8]
PH ₃	10,29	40,88	50,46	60,51	—	*41,80	50,92	64,31	72,84	[3]
PbCl ₂	12,55	33,64	55,40	67,95	74,98	80,17	86,86	—	—	[2, 3]
PbO (красная)	—	—	22,94	34,70	43,45	51,04	54,39	—	—	[2, 3]
PbO (желтая)	—	—	22,82	35,20	45,57	53,93	64,64	—	—	[2, 3]
RbI	15,06	34,73	46,02	50,38	52,30	(52,93)	55,15	—	—	[2, 3]
SF ₆	22,64	42,93	60,63	75,13	—	*117,9	133,5	147,2	158,1	[2, 3]
SO ₂	6,95	24,18	43,18	57,53	86,65	*43,47	48,99	54,52	57,11	[3]
Sb ₂ O ₄	—	—	37,99	72,26	106,9	121,7	135,2	162,3	—	[3]
SeF ₆	—	—	—	—	—	*127,9	141,3	150,7	156,6	[2]
SiC	—	—	2,38	10,00	22,07	34,35	41,34	48,62	55,61	[2, 3]
SiH ₄	9,41	26,19	51,46	61,35	—	*51,42	65,81	84,47	95,44	[3]
SiO ₂ (кварц)	1,00	3,93	11,92	24,94	39,33	53,60	64,39	68,41	72,47	[2, 3]
SiO ₂ (кристобаллит)	—	—	12,05	25,02	39,29	53,14	65,35	72,97	73,05	[2, 3]
SiO ₂ (тридимит)	—	—	12,47	25,52	39,79	61,50	63,68	68,12	73,64	[2, 3]
SnCl ₄	—	—	—	—	—	102,4	105,2	107,0	—	[3]
SnO ₂	—	—	15,48	32,89	49,08	64,42	73,93	81,77	87,99	[3]
SnS	—	—	29,29	41,76	47,82	50,38	55,27	56,57	—	[3, 14]
SrCO ₃	—	—	34,77	59,62	75,65	95,06	107,2	124,0	—	[3]
SrO	—	—	18,20	34,31	43,26	48,76	52,34	55,56	—	[3]
SrSO ₄	2,88	16,31	43,91	69,81	92,99	(113,5)	(124,6)	(146,9)	(174,7)	[2, 3]
TaC	—	—	15,65	24,18	34,43	—	—	—	—	[3]
Ta ₂ O ₅	—	—	44,64	86,61	124,3	150,3	167,0	172,7	185,4	[3]
ThO ₂	—	—	—	—	—	66,90	71,67	77,66	84,06	[2]
TiC	—	—	4,23	15,73	29,37	41,46	47,32	51,34	53,85	[3]
TiCl ₄	—	—	—	77,48	91,58	100,8	104,3	106,5	107,6	[2, 3]
TiO	—	—	8,54	22,84	36,07	45,40	51,09	58,94	68,41	[3]
TiO ₂ (рутил)	—	—	13,26	31,80	49,75	64,43	70,54	75,02	—	[3]
TiO ₂ (анатаз)	—	—	13,26	31,88	49,37	64,18	70,12	74,35	77,19	[3]
Ti ₂ O ₃	—	—	17,03	51,46	87,45	120,2	136,5	146,3	151,3	[3]
TiCl	14,74	28,84	42,38	48,37	50,63	53,56	55,23	*37,29	37,35	[2, 3]
UCl ₃	—	—	—	—	—	97,15	105,1	115,2	118,4	[3]
UF ₆	17,00	40,31	80,32	118,39	152,40	—	—	—	—	[3]
UO ₂	4,19	11,03	23,28	42,13	59,25	72,72	79,79	85,60	89,75	[3]
VC	—	—	6,99	18,37	29,71	38,83	44,43	51,38	58,74	[3]
V ₂ O ₃	—	—	18,20	60,54	95,48	116,6	128,5	140,5	151,7	[3]
WC	—	—	—	—	—	37,03	38,83	42,47	47,03	[5]
WO ₃	—	—	24,43	49,92	73,39	83,62	(91,92)	(104,9)	(121,0)	[2, 3]
ZnF ₂	0,983	6,95	23,86	46,44	61,76	—	—	—	—	[3]
ZnO	—	—	13,60	25,86	37,03	45,33	49,50	53,18	56,23	[2, 3]
ZnS	1,67	8,20	19,83	34,43	43,26	49,41	52,38	55,48	—	[3]
ZrN	—	—	15,82	24,69	36,78	44,77	48,66	52,76	—	[3]
ZrO ₂	—	—	13,05	32,30	50,58	63,85	70,25	75,73	—	[3]

Таблица 10.7

Теплоемкость воды C_p , дж/(моль·град), при давлении 760 мм рт. ст.

t, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	4,2174	4,2138	4,2104	4,2074	4,2045	4,2019	4,1996	4,1974	4,1954	4,1936
10	4,1919	4,1904	4,1890	4,1877	4,1866	4,1855	4,1846	4,1837	4,1829	4,1822
20	4,1816	4,1810	4,1805	4,1801	4,1797	4,1793	4,1790	4,1787	4,1785	4,1783
30	4,1782	4,1781	4,1780	4,1780	4,1779	4,1779	4,1780	4,1780	4,1781	4,1782
40	4,1783	4,1784	4,1786	4,1788	4,1789	4,1792	4,1794	4,1796	4,1799	4,1801
50	4,1804	4,1807	4,1811	4,1814	4,1817	4,1821	4,1825	4,1829	4,1833	4,1837
60	4,1841	4,1846	4,1850	4,1855	4,1860	4,1865	4,1871	4,1876	4,1882	4,1887
70	4,1893	4,1899	4,1905	4,1912	4,1918	4,1925	4,1932	4,1939	4,1946	4,1954
80	4,1961	4,1969	4,1977	4,1985	4,1994	4,2002	4,2011	4,2020	4,2029	4,2039
90	4,2048	4,2058	4,2068	4,2078	4,2089	4,2100	4,2111	4,2122	4,2133	4,2145
100	4,2156	—	—	—	—	—	—	—	—	—

10.4. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ НОРМАЛЬНОМ ДАВЛЕНИИ

Таблица 10.8

Теплоемкость C_p , Дж/(моль·град), органических соединений при давлении 760 мм рт. ст. [3, 18]

Верхняя шкала температур относится к конденсированному состоянию, нижняя — к газу.

Формула	Название	Состояние	Температура, °К			
		Конденсат	20	40	80	150
		Газ	400	600	1000	1500
CH ₄	Метан	Конденсат	—	28,66	40,58	—
		Газ	40,74	52,49	72,01	86,7
CH ₃ F	Фторметан	Газ	44,02	57,74	77,11	90,21
CH ₃ Cl	Хлорметан	Конденсат	6,28	22,51	42,38	62,34
		Газ	48,12	61,25	78,91	91,00
CH ₃ Br	Бромметан	Конденсат	10,71	26,24	45,15	56,23
		Газ	49,92	62,63	79,50	91,25
CH ₂ Cl ₂	Дихлорметан	Газ	61,46	72,63	87,03	95,98
CHF ₃	Трифторметан (фреон-23)	Газ	61,04	75,86	90,92	—
CHF ₂ Cl	Дифторхлорметан (фреон-22)	Газ	65,46	77,28	92,51	99,62
CHFCl ₂	Фтордихлорметан (фреон-21)	Газ	70,08	82,47	94,22	100,5
CF ₄	Тетрафторметан (фреон-14)	Конденсат	20,29	42,80	67,36	—
		Газ	72,63	87,03	98,95	—
CF ₃ Cl	Трифторхлорметан (фреон-13)	Газ	77,59	90,37	100,5	104,5
CF ₂ Cl ₂	Дифтордихлорметан (фреон-12)	Газ	98,66	112,0	123,4	128,3
CF ₂ Br ₂	Дифтордибромметан (фреон-12Б2)	Газ	85,60	95,35	102,8	—
CFC1 ₃	Фтортрихлорметан (фреон-11)	Конденсат	21,40	40,05	55,35	83,89
		Газ	87,04	96,66	103,4	105,9
CCl ₄	Четыреххлористый углерод	Конденсат	21,33	40,92	58,91	84,89
		Газ	91,71	99,66	104,8	—
CH ₄ O	Метиловый спирт	Конденсат	5,86	18,33	37,66	55,65
		Газ	51,42	67,03	89,45	—
CH ₂ O	Муравьиная кислота	Конденсат	4,10	14,16	29,43	44,14
		Газ	56,96	69,66	84,68	94,27
CH ₂ O	Формальдегид	Газ	39,19	48,10	61,90	71,10
C ₂ H ₆	Этан	Конденсат	6,42	24,87	53,22	70,22
		Газ	65,6	89,3	122,7	146,0
C ₂ H ₄ Cl ₂	Дихлорэтан	Конденсат	12,26	32,55	54,02	91,21
		Газ	92,22	112,4	138,3	155,3
C ₂ H ₄	Этен (этилен)	Конденсат	6,36	23,70	48,33	67,23
		Газ	53,97	71,55	94,43	110,29
C ₂ H ₆ O	Этиловый спирт	Кристалл	7,155	17,25	40,80	—
		Аморфный	8,290	24,07	46,38	—
		Газ	87,56	112,2	145,0	167,7
C ₂ H ₆ O	Диметиловый эфир	Конденсат	8,20	24,89	47,91	98,91
C ₂ H ₄ O	Ацетальдегид	Газ	65,81	85,86	112,8	—
C ₂ H ₄ O	Этилена окись	Конденсат	5,98	21,80	42,09	64,39
		Газ	65,90	86,27	114,9	—
C ₂ H ₄ O ₂	Уксусная кислота	Конденсат	—	—	—	59,5
		Газ	81,67	105,2	133,8	152,5
C ₂ H ₂ O	Кетен	Газ	56,15	69,58	83,81	93,93
C ₂ H ₂	Этин (ацетилен)	Газ	50,10	57,44	66,62	74,07
C ₃ H ₈	Пропан	Конденсат	6,66	25,08	50,38	88,07
		Газ	94,3	129,2	175,0	206,1
C ₃ H ₆	Пропен	Конденсат	9,58	28,95	53,51	87,11
		Газ	79,91	107,5	144,2	169,0
C ₃ H ₈ O	2-Пропиловый спирт	Конденсат	8,41	24,7	46,1	74,1
C ₃ H ₆ O	Ацетон	Конденсат	10,3	30,2	56,8	83,2
		Газ	92,05	122,8	163,8	191,3
C ₄ H ₁₀	n-Бутан	Конденсат	4,52	27,45	55,65	115,1
		Газ	124,7	169,1	226,8	265,7
C ₄ H ₈	1-Бутен	Конденсат	8,21	28,48	53,89	105,4
		Газ	112,7	149,9	197,7	229,8
C ₅ H ₁₂	n-Пентан	Конденсат	10,25	31,00	62,84	140,6
		Газ	154,4	208,7	278,5	325,3
C ₅ H ₁₀	1-Пентен	Конденсат	10,54	32,93	61,92	129,2
		Газ	143,1	189,8	249,4	289,4
C ₆ H ₁₄	Гексан	Конденсат	10,84	34,64	70,08	109,0
		Газ	184,3	248,4	330,3	385,0
C ₆ H ₆	Бензол	Конденсат	8,37	26,53	44,93	64,64
		Газ	111,9	157,9	209,9	241,3

Формула	Название	Состояние	Температура, °К			
		Конденсат	20	40	80	150
		Газ	400	600	1000	1500
C_7H_8	Толуол	Газ	139,1	194,9	260,2	300,3
C_8H_{10}	о-Ксилол	Конденсат	11,00	31,80	60,38	96,06
		Газ	171,7	234,2	311,1	359,5
C_8H_8	Стирол	Конденсат	11,71	32,28	56,19	90,75
		Газ	160,3	218,2	284,2	324,6
$C_{10}H_8$	Нафталин	Конденсат	9,37	30,12	51,99	81,75
		Газ	180,7	250,8	328,8	374,4
$C_{10}H_8$	Азулен	Газ	176,4	248,2	327,4	—

10.5. ТЕПЛОЕМКОСТЬ C_P И ОТНОШЕНИЕ C_P/C_V ДЛЯ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ

Таблица 10.9

Зависимость теплоемкости C_P , кал/(г·град), газов и жидкостей от давления и температуры
 Аг, аргон [19, 20]

T, °К	Давление, атм					
	1	4	10	40	70	100
110	0,12833	0,14253	—	0,326*	0,313*	0,297
130	0,12678	0,13482	0,1506	0,365	0,334	0,314
150	0,12598	0,13119	0,14825	0,359	—	0,380
170	0,12553	0,12915	0,13731	0,2258	0,330**	0,532
200	0,12514	0,12749	0,13248	0,16467	0,20895	0,25870
220	0,12498	0,12681	0,13069	0,15372	0,18407	0,21890
250	0,12481	0,12614	0,12890	0,14427	0,16218	0,18208
300	0,12466	0,12552	0,12726	0,13631	0,14576	0,15522
350	0,12457	0,12514	0,12637	0,13183	0,13681	0,14527
450	0,12448	0,12482	0,12549	0,12880	0,13208	0,13537
600	0,12443	0,12461	0,12495	0,12666	0,12830	0,12989

* При $T = 120^\circ\text{К}$.** При $T = 180^\circ\text{К}$.

T, °К	Давление, атм					
	300	500	1000	2000	3000	5000
110	—	0,227	0,196	—	—	—
160	0,264	0,2308	0,2094	0,1945	0,1883	—
190	0,273	0,2398	0,2200	0,2054	0,1978	0,1897
220	0,262	0,2451	0,2301	0,2164	0,2078	0,1982
250	0,2346	0,2370	0,2353	0,2246	0,2135	0,2021
280	0,2083	0,2213	0,2306	0,2201	0,2089	0,2010
320	0,1846	0,1988	0,2090	0,1979	0,1812	0,1745
400	0,1614	0,1674	0,1681	—	—	—
500	0,1498	0,1522	0,1513	—	—	—

Ar, Аргон

P, атм	Температура, °K					
	800	1000	1400	1800	2200	3000
1	0,12440	0,12439	0,12438	0,12438	0,12437	0,12437
10	0,12468	0,12456	0,12446	0,12442	0,12440	0,12438
100	0,12726	0,12616	0,12517	0,12482	0,12462	0,12447

H₂, водород [3, 20]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	1	10	100		1	10	100
30	2,590	—	—	100	2,683	2,750	3,248
40	2,527	3,413	—	110	2,751	2,804	3,205
50	2,507	2,905	—	130	2,889	2,925	3,198
60	2,508	2,704	3,900	150	3,012	3,039	3,246
70	2,528	2,693	3,732	200	3,235	3,249	3,364
80	2,568	2,684	3,513	300	3,420	3,426	3,476
90	2,620	2,708	3,318	600	3,477	3,479	3,485

N₂, азот [20]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	1	10	100		1	10	100
100	0,25627	—	—	400	0,24972	0,25148	0,2676
140	0,25070	0,28074	—	500	0,25248	0,25353	0,26318
180	0,24957	0,26211	—	700	0,26243	0,26292	0,26747
220	0,24911	0,25641	0,347	1000	0,27896	0,27919	0,28122
260	0,24889	0,25370	0,303	1400	0,29450	0,29459	0,29552
300	0,24884	0,25226	0,2852	1800	0,30374	0,30379	0,30426
350	0,24907	0,25146	0,2736	3000	0,31596	0,31597	0,31607

O₂, кислород [20]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	1	10	100		1	10	100
120	0,22145	—	—	450	0,22859	0,22990	0,2427
150	0,21950	0,24535	—	550	0,23612	0,23695	0,2450
170	0,21894	0,23474	—	700	0,24642	0,24690	0,2516
210	0,21848	0,22687	0,4024	1000	0,26052	0,26074	0,2628
250	0,21868	0,22400	0,2925	1400	0,27108	0,27118	0,2721
300	0,21985	0,22325	0,2586	1800	0,27863	0,27869	0,2792
350	0,22206	0,22441	0,2475	2200	0,28561	0,28565	0,2860
400	0,22507	0,22679	0,2435	3000	0,29846	0,29847	0,2986

B₂H₆, диборан [21]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	1	10	100		1	10	100
190	0,3732	—	—	420	0,6436	0,6543	0,8245
240	0,4135	0,5572	—	440	0,6686	0,6779	0,8117
270	0,4482	0,5195	—	460	0,6932	0,7013	0,8100
300	0,4863	0,5282	1,3266	500	0,7407	0,7472	0,8245
360	0,5656	0,5844	1,0150	800	1,0265	1,0287	1,0498
400	0,6179	0,6306	0,8563	1500	1,3403	1,3409	1,3468

CO, окись углерода [20]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	1	10	100		1	10	100
200	0,2495	0,2600	—	600	0,2598	0,2606	0,2682
220	0,2493	0,2575	—	700	0,2660	0,2666	0,2719
280	0,2490	0,2536	0,2902	900	0,2780	0,2783	0,2814
350	0,2495	0,2523	0,2765	1200	0,2916	0,2918	0,2934
450	0,2521	0,2538	0,2589	1800	0,3064	0,3065	0,3070
520	0,2553	0,2565	0,2669	3000	0,3175	0,3175	0,3175

CO₂, двуокись углерода [20, 22]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	1	10	100		1	10	100
220	0,1871	—	—	340	0,2127	0,2226	0,4140
240	0,1904	0,3321	—	420	0,2288	0,2339	0,2976
250	0,1924	0,2605	—	490	0,2410	0,2442	0,2695
260	0,1946	0,2316	—	550	0,2502	0,2525	0,2784
270	0,1969	0,2186	0,513*	600	0,2572	0,2589	0,2787
280	0,1992	0,2187	0,5592*	700	0,2693	0,2704	0,2830
290	0,2015	0,2191	0,6553*	800	0,2794	0,2802	0,2884
300	0,2038	0,2195	—	1000	0,2950	0,2954	0,2998
320	0,2083	0,2207	0,9338	1200	0,3059	0,3063	0,3090
330	0,2105	0,2215	0,5170	1500	0,3170	0,3172	0,3188

* При T = 273,15°K.

** При T = 283,15°K.

** При T = 293,15°K.

H₂O, вода [23]

T, °K	Давление, атм					T, °K	Давление, атм				
	1	25	100	200	500		1	25	100	200	500
273,15	1,007	—	0,995	0,987	—	613	0,485	0,545	1,028	1,679	—
323,15	0,998	—	0,993	0,988	—	633	0,487	0,573	0,878	2,907	—
373,15	0,492	—	1,001	0,996	—	643	0,489	0,543	0,823	3,768	—
403,15	0,477	—	1,013	1,007	—	663	0,492	0,531	0,755	1,733	—
443,15	0,470	—	1,036	1,028	—	693	0,498	0,535	0,689	1,161	—
473,15	0,472	—	1,063	1,051	—	723	0,502	0,535	0,650	0,938	—
503,2	0,474	0,745	1,103	1,085	—	773	0,510	0,539	0,615	0,785	1,709
513,2	0,474	0,694	1,122	1,100	—	823	0,519	0,544	0,600	0,708	1,198
543,2	0,477	0,613	1,202	1,162	—	873	0,527	0,549	0,590	0,667	0,970
573	0,480	0,574	1,363	1,273	—	973	0,544	0,562	0,583	0,626	0,82
583	0,481	0,565	1,662	1,332	—						

NH₃, аммиак [22]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	1	10	50		100	500	1000 ...
300	0,516	0,746	1,14*	310	1,11	1,02	0,91
320	0,519	0,663	1,17	350	1,26	1,06	0,94
340	0,524	0,616	1,26	370	1,41	1,09	0,96
360	0,536	0,599	1,43	380	1,55	1,10	0,97
380	0,538	0,583	1,04	390	1,85	1,12	0,98
400	0,546	0,587	0,88	400	1,81	1,14	0,99
420	0,554	0,587	0,79	420	1,47	1,20	1,00
440	0,563	0,587	0,73	440	1,10	1,24	1,00
480	0,580	0,599	0,70	480	0,86	1,30	1,00
520	0,598	0,616	0,69	520	0,79	1,21	0,97
580	0,624	0,640	0,68	560	0,74	1,01	0,93

* При T = 310°K.

CH₄, метан [23]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	0	25	100		0	25	100
323,15	0,5481	0,575	0,682	573,2	0,7587	0,765	0,783
373,15	0,5853	0,604	0,664	673,2	0,8435	0,848	0,860
423,15	0,6273	0,640	0,682	773,2	0,9216	0,925	0,933
473,15	0,6700	0,680	0,710	873,2	0,9926	0,996	1,003
523,2	0,7140	0,722	0,744	973,2	1,057	1,052	1,064

C₂H₆, этан [2]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	0	17	34		0	17	34
294,25	0,4183	0,4853	0,7673	344,25	0,4661	0,5068	0,5761
310,95	0,4343	0,4900	0,6215	360,95	0,4821	0,5203	0,5801
327,55	0,4502	0,4980	0,5865	377,55	0,4988	0,5355	0,5896

C₂H₂, этин (ацетилен) [19]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	0,1	1	10		0,1	1	10
240	0,3657	0,3726	0,4664	290	0,3976	0,4011	0,4422
270	0,3853	0,3895	0,4445	300	0,4034	0,4068	0,4429
280	0,3915	0,3953	0,4429	320	0,4149	0,4184	0,4472

$C_2F_3Cl_3$, трифтортрихлорэтан (фреон-113) [23]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	10	20	30		10	20	30
253,15	0,216	0,215	0,214	323,15	0,232	0,229	0,226
263,15	0,218	0,216	0,215	333,15	0,234	0,231	0,228
273,15	0,220	0,218	0,217	343,15	0,237	0,233	0,230
283,15	0,222	0,220	0,218	353,15	0,239	0,236	0,232
293,15	0,225	0,222	0,220	363,15	0,242	0,239	0,234
303,15	0,225	0,224	0,222	373,15	0,246	0,242	0,237
313,15	0,229	0,226	0,224	383,15	0,251	0,246	0,240

 C_3H_8 , пропан [19]

T, °K	Давление, атм						
	0,1	1	5	10	50	100	250
230	0,322	0,537	0,537	0,537	0,528	—	—
240	0,333	0,340	0,540	0,540	0,528	—	—
250	0,342	0,349	0,542	0,542	0,531	—	—
260	0,354	0,360	0,546	0,546	0,535	—	—
270	0,365	0,372	0,558	0,555	0,542	—	—
280	0,374	0,381	0,449	0,574	0,553	0,549	—
290	0,385	0,390	0,435	0,601	0,574	0,567	—
300	0,397	0,401	0,431	0,637	0,599	0,590	—
310	0,406	0,413	0,438	0,517	0,630	0,615	0,585
320	0,417	0,424	0,444	0,499	0,669	0,642	0,596
340	0,440	0,444	0,460	0,483	0,787	0,698	0,621
360	0,463	0,465	0,476	0,492	0,880*	0,764	0,649
380	0,485	0,487	0,497	0,508	—	0,832	0,673
400	0,508	0,510	0,517	0,526	0,737**	0,905	0,696
440	0,553	0,555	0,560	0,567	0,678	0,921	0,739
480	0,596	0,599	0,603	0,608	0,664	0,834	0,778
520	0,637	0,637	0,642	0,646	0,680	0,778	0,798
560	0,669	0,669	0,671	0,676	0,701	0,755	0,789
600	0,696	0,696	0,698	0,701	0,719	0,751	0,782

* При $T = 350$ °K.** При $T = 420$ °K.

Воздух [3]

T, °K	Давление, атм			T, °K	Давление, атм		
	1	10	100		1	10	100
110	0,2442	0,3298	—	500	0,2461	0,2472	0,2565
130	0,2424	0,2800	—	700	0,25696	0,2575	0,2619
150	0,2415	0,2637	—	1000	0,2730	0,2732	0,2752
180	0,2408	0,2533	0,580	1500	0,2942	0,2943	0,2951
200	0,2404	0,2492	0,4170	2000	0,3198	0,3165	0,3159
250	0,2403	0,2455	0,3062	2400	0,3762	0,3448	0,3352
300	0,2405	0,2439	0,2776	2800	0,5399	0,4068	0,3634
400	0,2424	0,2441	0,2599	3000	0,6833	0,4613	0,3843

Таблица 10.10

Продолжение табл. 10.10

Отношение теплоемкостей $\alpha = C_p/C_v$ некоторых газов

T, °K	Давление, атм		
	1	10	100
Азот, N ₂ [20]			
100	1,424	—	—
140	1,410	1,526	—
180	1,406	1,462	—
220	1,403	1,437	1,85
260	1,402	1,424	1,65
300	1,401	1,417	1,566
350	1,400	1,411	1,512
400	1,398	1,406	1,480
450	1,396	1,401	1,455
500	1,391	1,396	1,437
600	1,382	1,385	1,410
700	1,371	1,373	1,390
800	1,360	1,361	1,372
900	1,350	1,351	1,359
1000	1,341	1,342	1,347
1200	1,327	1,327	1,331
1500	1,317	1,317	1,319
Аммиак, NH ₃ [22]			
320	1,308	1,410	—
340	1,298	1,356	—
360	1,304	1,343	—
400	1,277	1,315	—
460	1,260	1,279	1,668
520	1,232	1,258	1,447
580	1,230	1,243	1,333
Аргон, Ar [3, 20]			
100	1,627	—	—
120	1,678	—	—
140	1,675	—	—
160	1,674	1,803	—
180	1,675	1,759	—
200	1,674	1,740	3,021
240	1,673	1,711	2,328
260	1,671	1,709	2,17
280	1,670	—	—
300	1,670	1,697	1,96
320	1,669	1,697	—
360	1,669	1,679	—
400	1,668	1,682	1,80
450	1,668	1,679	1,780
500	1,668	1,676	1,753
550	1,667	1,669	—
600	1,667	1,673	1,721
Ацетилен, C ₂ H ₂ [19]			
160	1,354	—	—
180	1,333	—	—
200	1,313	—	—
240	1,407	1,479	—
260	1,261	1,392	—
280	1,247	1,339	—
290	1,240	1,318	—
300	1,233	1,299	—
310	1,223	1,288	—
320	1,221	1,273	—

T, °K	Давление, атм		
	1	10	100
Водород, H ₂ [20]			
30	1,736	—	—
50	1,684	1,913	—
70	1,655	1,738	2,256
90	1,611	1,655	1,945
110	1,563	1,586	1,768
130	1,521	1,536	1,654
150	1,488	1,500	1,579
180	1,455	1,461	1,507
210	1,433	1,437	1,468
240	1,419	1,422	1,442
270	1,410	1,413	1,427
300	1,405	1,406	1,417
340	1,401	1,401	1,409
380	1,399	1,399	1,404
420	1,398	1,398	1,402
460	1,397	1,398	1,400
500	1,397	1,397	1,398
550	1,396	1,397	1,397
600	1,396	1,396	1,396
Воздух [20]			
120	1,4166	1,6395	—
140	1,4119	1,5350	—
160	1,4089	1,4896	—
180	1,4071	1,4648	—
200	1,4057	1,4489	2,1376
240	1,4040	1,4313	1,7439
280	1,4024	1,4214	1,6094
300	1,4017	1,4177	1,5711
320	1,4008	1,4146	1,5425
360	1,3987	1,4091	1,5024
400	1,3961	1,4041	1,4752
450	1,3920	1,3979	1,4498
500	1,3871	1,3918	1,4321
550	1,3818	1,3854	1,4170
600	1,3760	1,3788	1,4041
650	1,3702	1,3726	1,3931
700	1,3646	1,3664	1,3832
800	1,354	1,355	1,3665
900	1,345	1,345	1,3533
1000	1,336	1,336	1,3423
1200	1,322	1,322	1,3257
1500	1,304	1,304	1,3056
Кислород, O ₂ [3, 20]			
220	1,403	1,441	2,120
260	1,400	1,425	1,721
300	1,396	1,414	1,599
350	1,391	1,403	1,526
400	1,382	1,391	1,478
450	1,374	1,381	1,445
500	1,366	1,371	1,420
600	1,350	1,353	1,383
700	1,337	1,339	1,353
Пропан, C ₃ H ₈ [19]			
240	1,80	—	—
260	1,125	—	—
280	1,106	—	—
300	1,143	—	—
340	1,111	1,169	—
360	1,109	1,147	—

T, °K	Давление, атм		
	1	10	100
400	1,097	1,124	—
440	1,088	1,112	1,519
480	1,065	1,099	1,421
520	1,076	1,091	1,271
560	1,069	1,090	1,189
600	1,069	1,074	1,150
Углерода двуокись, CO ₂ [20]			
220	1,349	—	—
250	1,324	1,416	—
300	1,293	1,352	—
350	1,271	1,305	2,40
400	1,254	1,276	1,630
450	1,241	1,256	1,463
500	1,230	1,241	1,387
600	1,214	1,220	1,291
700	1,202	1,206	1,247
800	1,193	1,196	1,222
900	1,186	1,188	1,206
1000	1,181	1,183	1,196
1200	1,173	1,174	1,183
1500	1,166	1,167	1,172
Углерода окись, CO [3]			
280	1,402	1,424	1,698
300	1,401	1,420	1,633
350	1,399	1,414	1,542
400	1,396	1,406	1,494
450	1,392	1,400	1,463
500	1,387	1,393	1,441
600	1,376	1,381	1,409
700	1,364	1,366	1,386
800	1,352	1,354	1,368

10.6. РАСТВОРЫ И ЖИДКИЕ СМЕСИ

Теплоемкость соединений неиндивидуального состава (смесей, растворов, сплавов и т. п.) приближенно удовлетворяет правилу смешения:

$$C_{\text{смеси}} = \sum_k z_k C_k,$$

где z_k — атомная (молярная, массовая, объемная) доля k -компоненты смеси; C_k — атомная (молярная, удельная или объемная соответственно) теплоемкость этой компоненты.

Для твердых тел правило смешения выполняется и для простой смеси, и для интерметаллического соединения. Отклонения от правила смешения наблюдаются, когда при нагревании происходит изменение состава или структуры вещества, а также в водных растворах электролитов. Плохо выполняется правило смешения для смесей газов при больших давлениях; обычно теплоемкость, рассчитанная по правилу смешения, меньше экспериментальной.

Теплоемкость C_p , кал/(г·град), жидких смесей и растворов при давлении 760 мм рт. ст. [23]

t, °C	C_p	t, °C	C_p
Дифенильная смесь*		H ₂ O + 6% Na ₂ SO ₄	
20	0,38	15	0,867
40	0,40	20	0,867
60	0,41	40	0,869
80	0,43	60	0,885
100	0,45	70	0,900
140	0,49	80	0,929
180	0,54	90	1,002
220	0,58	92	1,022
260	0,63	94	1,06
300	0,66		
350	0,69		
400	0,72		
H ₂ O + 6% NaCl		H ₂ O + 9% Na ₂ SO ₄	
15	0,954	15	0,846
20	0,951	20	0,847
60	0,929	40	0,852
100	0,907	60	0,861
H ₂ O + 10% NaCl		70	0,873
15	0,922	80	0,901
20	0,920	90	0,956
60	0,898	92	0,972
100	0,872	94	0,990
H ₂ O + 15% NaCl		96	1,01
15	0,842		
20	0,841		
60	0,830		
100	0,793		
H ₂ O + 24,26% NaCl		H ₂ O + 10% KI ₂	
15	0,783	15	0,846
20	0,783	20	0,849
60	0,775	60	0,869
100	0,759	100	0,897
H ₂ O + 1,5% Na ₂ SO ₄		H ₂ O + 20% KI ₂	
15	0,911	15	0,757
20	0,912	20	0,759
40	0,921	60	0,775
60	0,959	100	0,797
70	1,001		
80	1,07		
90	1,167		
92	1,185		
H ₂ O + 3% Na ₂ SO ₄		H ₂ O + 30% KI ₂	
15	0,886	15	0,644
20	0,886	20	0,646
40	0,892	60	0,666
60	0,909	100	0,686
70	0,941		
80	0,998		
90	1,077		
		H ₂ O + 6,5% C ₂ H ₆ O	
		23	1,030
		41	1,032
		H ₂ O + 37% C ₂ H ₆ O	
		23	0,858
		41	0,874
		H ₂ O + 78% C ₂ H ₆ O	
		23	0,660
		41	0,684

* Даутерм: 73,5% дифенилового эфира + 26,5% дифенила.

Таблица 10.12

Теплоемкость сталей при давлении 760 мм рт. ст.

Марка стали	$t, ^\circ\text{C}$	$C_p, \text{ кал/(г}\cdot\text{град)}$	Литература
-------------	---------------------	--	------------

Углеродистые стали

08	900	0,156	[24]
	1300	0,159	[24]
Ст. 15	0÷100	0,112	[25]
	300	0,132	[24]
	500	0,163	[24]
	705	0,316	[24]
	800	0,161	[24]
	1000	0,153	[24]
Ст. 20	100	0,110	[24]
	300	0,125	[24]
	650	0,195	[24]
Ст. 25	0÷100	0,112	[25]
	0÷400	0,125	[25]
	550	0,154	[24]
	900	0,155	[24]
	1100	0,156	[24]
	1300	0,166	[24]
Ст. 10; 30; 35	0÷100	0,112	[25]
	0÷600	0,136	[25]
Ст. 40	100	0,112	[25]
	600	0,137	[25]
	1100	0,152	[24]
	1300	0,166	[24]
Ст. 45	0÷100	0,112	[25]
	0÷400	0,125	[25]
	0÷600	0,137	[25]
	900	0,150	[24]
	1100	0,152	[24]
	1300	0,164	[24]
Ст. 50	100	0,134	[24]
	400	0,153	[24]
	600	0,268	[24]
	640	0,828	[24]
	700	0,160	[24]
	800	0,153	[24]
	900	0,150	[24]

Легированные стали

1X13	20	0,11	[26]
2X13	200	0,12	[25]
3X13	200	0,117	[25]
	500	0,135	[25]
X17, X28	20	0,11	[26]
X9C2	20	0,111	[27]
	600	0,218	[27]
	900	0,235	[27]
12XC	0÷100	0,115	[25]
10XC2M	200	0,114	[25]
X18H9	20	0,12	[26]
2X18H9	100	0,112	[26]
	600	0,174	[27]
	900	0,24	[27]
0X18H10	20	0,12	[26]
12XH2	60	0,108	[28]
X23H13	20	0,121	[28]

Марка стали	$t, ^\circ\text{C}$	$C_p, \text{ кал/(г}\cdot\text{град)}$	Литература
X23H18	20	0,12	[26]
X25T	20	0,11	[26]
12XM	20	0,115	[25]
15XMA	0÷100	0,116	[25]
20XM, 20XMA	20÷100	0,113	[25]
	20÷600	0,139	[25]
30XM	20	0,11	[25]
1X18H9T	20	0,12	[28]
X18H10T	20	0,12	[26]
X18H25C2	20	0,123	[25]
X20H14C2	20	0,12	[26]
X20H20C2	20	0,14	[26]
12XH3A	380	0,157	[28]
	425	0,154	[28]
30XH3A	34	0,111	[28]
	512	0,154	[28]
33H3MA	20	0,11	[25]
25X2MΦA	20	0,11	[25]
1X14H14B2M	20	0,128	[25]
4X14H14B2M	20	0,124	[25]

Таблица 10.13

Теплоемкость двухкомпонентных сплавов, не содержащих железа [29]

Состав	$t, ^\circ\text{C}$	$C_p, \text{ дж/(г}\cdot\text{град)}$
67% Al; 33% Cu	—150	0,415
	—100	0,499
	0	0,605
50% Al; 50% Cu	—150	0,35
	—100	0,42
	0	0,51
33% Al; 67% Cu	100	0,46
	500	0,53
25% Al; 75% Cu	—150	0,31
	—100	0,36
	0	0,43
92% Al; 8% Mg	20	1,15
32% Al; 68% V	15÷100	0,655
60% Al; 40% Zп	20÷100	0,565
80% Au; 20% Cu	—136	0,164
	—39	0,180
	12	0,183
$x\%$ Bi; $(100-x)\%$ Cd	17÷100	$0,2294+0,001636x$
$x\%$ Bi; $(100-x)\%$ Pb	0÷100	$0,1298+0,000113x$
$(x < 50\%)$		
$x\%$ Bi; $(100-x)\%$ Pb	0÷100	$0,1471-0,000217x$
$(50\% < x < 96\%)$		
99% Bi; 1% Sn	0÷100	0,1266
97% Bi; 3% Sn	0÷100	0,1315
94% Bi; 6% Sn	0÷100	0,1340
50% Bi; 50% Sn	0÷100	0,1818
25% Bi; 75% Sn	0÷100	0,2088
7% Bi; 93% Sn	0÷100	0,2236
3% Bi; 97% Sn	0÷100	0,2266
32% Cd; 68% Sn	—77÷20	0,232
	20÷100	0,234

Состав	$t, ^\circ\text{C}$	$C_p, \text{дж}/(\text{г}\cdot^\circ\text{град})$
67% Cu; 33% Mg	—150	0,30
	0	0,40
	200	0,51
	400	0,57
33% Cu; 67% Mg	—150	0,44
	—100	0,51
	0	0,61
90% Cu; 10% Mn	—136	0,323
	—39	0,376
	12	0,396
68% Cu; 32% Mn	—136	0,346
	—39	0,400
	12	0,414
95% Cu; 5% Ni	—136	0,306
	—39	0,358
	12	0,379
90% Cu; 10% Ni	—136	0,307
	—39	0,366
	12	0,380
	0	0,410
40% Cu; 60% Ni (кон- стантан)	100	0,427
$x\%$ Cu; $(100-x)\%$ Ni (бронзы, $10\% < x < 90\%$)	$18 \div 100$	$0,2273 + 0,00155x$
$(100-x)\%$ Cu; $x\%$ Zn (латунь, $10\% < x < 90\%$)	$18 \div 100$	0,387
10% Ir; 90% Pt	$20 \div 100$	0,1352
95% Mn; 5% Ni	—136	0,387
	—39	0,435
	12	0,445
90% Mn; 10% Ni	—136	0,386
	—39	0,435
	12	0,459
55% Mn; 45% Ni	—136	0,386
	—39	0,448
	12	0,464
$x\%$ Pb; $(100-x)\%$ Sb ($5\% < x < 96\%$)	$20 \div 100$	$0,1301 + 0,0008x$
		0,1507
64% Pb; 36% Sn	—179 $\div$ —79	0,1628
	—79 $\div$ 18	0,1705
	12 $\div$ 99	0,1705
36% Pb; 64% Ti	0 $\div$ 25	0,1281
$x\%$ Sn; $(100-x)\%$ Zn	$16 \div 100$	$0,2294 + 0,001636x$

Теплоемкость многокомпонентных специальных сплавов

Сплав (состав)	$t, ^\circ\text{C}$	$C_p, \text{кал}/(\text{г}\cdot^\circ\text{град})$	Литература
Алюмель	0	0,125	[30]
Белл-металл	$15 \div 98$	0,0858	[30]
Вуда сплав	$5 \div 150$	0,0352	[31]
	$100 \div 150$	0,0426	[31]
Инвар	—	0,12	[30]
Липовица сплав	$5 \div 50$	0,0345	[31]
	$100 \div 150$	0,0426	[31]
Манганин (84% Cu; 12% Mn; 4% Ni)	18	0,0973	[30]
	100	0,1004	[30]
Монель	$20 \div 1300$	0,127	[30]
Розе сплав	$-77 \div 20$	0,0356	[31]
	$20 \div 89$	0,0552	[31]
Фосфористая бронза	$-188 \div 18$	0,081	[31]
	$20 \div 100$	0,0876	[31]
Хромель (56% Na; 44% K)	—	0,107	[30]
	200	0,269	[25]
	300	0,261	[25]
	400	0,255	[25]
	800	0,250	[25]
(22% Na; 78% K)	100	0,225	[25]
	600	0,209	[25]
	800	0,213	[25]
(44,5% Pb; 55,5% Bi)	0	0,03	[25]
	100	0,035	[25]
	150	0,035	[25]
(48% Bi; 26% Pb; 13% Sn; 13% Cd)	0	0,031	[25]
(50% Bi; 31% Pb 19% Sn)	0	0,033	[25]
(29,9% Bi; 17,5% Sb; 18,7% Zn; 33,9% Sn)	$20 \div 99$	0,0566	[30]
42% Ni; 57% Fe; 1% Mn)	—	0,12	[30]

Таблица 10.15

Теплоемкость технических материалов (неметаллов)

Наименование	t, °C	C _p , кал/(г·град)	Лите- ратура	Наименование	t, °C	C _p , кал/(г·град)	Лите- ратура
Топлива и масла				Крон	10÷15	0,161	[30]
Бензин (Б-70)	20	0,492	[23]	Натриево	20÷100	0,1924	[34]
	100	0,587	[23]		20÷300	0,2351	[34]
	200	0,727	[23]		20÷500	0,2516	[34]
Бензин, пары	150	0,558	[23]		20÷700	0,2619	[34]
	250	0,617	[23]		20÷1000	0,2690	[34]
Глицерин технический	15÷50	0,576	[30]	Оконное	0÷100	0,16	[28]
Керосин (Т-1)	20	0,478	[23]	Пирекс	-100÷0	0,1445	[32]
	100	0,568	[23]		20÷100	0,1695	[34]
	250	0,755	[23]		0÷300	0,2053	[32]
Керосин, пары	200	0,591	[23]		0÷500	0,2270	[32]
Масло техническое	20	0,44	[23]	Термометрическое 16'''	40÷800	0,271	[34]
АМГ-10				Флинт	40÷1000	0,287	[34]
Масло техническое МС-20	20	0,488	[23]		19÷100	0,1988	[30]
	150	0,584	[23]		10÷50	0,117	[30]
Масла растительные	20	0,39÷0,47	[30]	Стекла из природных силикатов			
Нефть	20÷60	0,51	[30]	Анорит	0÷100	0,1881	[29]
Пластические вещества				(CaO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂)	0÷500	0,2306	[29]
Акриловые пластмассы	—	0,35	[30]		0÷700	0,2406	[29]
Асфальт	20	0,40	[32]	Альбит	0÷100	0,1977	[29]
Винипласт	20	0,24	[24]	(Na ₂ O·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂)	0÷500	0,2410	[29]
Капрон	20	0,55	[24]		0÷900	0,2640	[29]
Нейлон	20	0,4	[30]	Микроклин	0÷100	0,1919	[29]
Оргстекло	20	0,34÷0,37	[24]	(K ₂ O·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂)	0÷500	0,2321	[29]
Парафин	-20÷3	0,377	[30]		0÷1100	0,2598	[29]
Парафин жидкий	60	0,712	[30]	Волластонит (CaO·SiO ₂)	0÷100	0,1852	[29]
Полистироновые пластмассы	20	0,32	[24]		0÷700	0,2355	[29]
Полиэтилен	-173	0,15	[24]	Диопсид	0÷100	0,1938	[29]
	20	0,60	[16]	(CaO·MgO·2SiO ₂)	0÷700	0,2439	[29]
Полиэфирные пластмассы	20	0,26÷0,55	[24]	Природные вещества, минералы			
Фторопласт-3	20	0,22	[24]	Андалузит	0÷100	0,168	[30]
Фторопласт-4 (тефлон)	-253	0,0183	[33]	Апатит	15÷99	0,190	[30]
	-223	0,0491	[33]	Асбест	20÷98	0,195	[30]
	-196	0,0739	[33]	Аугит	20÷98	0,193	[30]
	-173	0,0931	[33]	Берилл	50	0,201	[30]
	-123	0,1320	[33]	Боракс	35	0,161	[30]
	-73	0,1660	[33]	Базальт	0	0,204	[30]
Этролы целлюлозные	7	0,2480	[33]		400	0,273	[30]
Каучук, резина					1200	0,357	[30]
Каучук вулканизированный	20	0,4	[30]	Гипс	-200	0,077	[30]
Резина вулканизированная	20	0,51	[24]	Гранит	0	0,246	[30]
Резина невулканизированная	20	0,45	[30]		0	0,156	[30]
Эбонит	20	0,341	[24]		400	0,256	[30]
Стекла					800	0,311	[30]
Кварцевое	20	0,213	[24]	Гнейс	0	0,177	[30]
	200	0,213	[24]		200	0,242	[30]
	400	0,230	[24]	Графит	—	0,2	[32]
	600	0,240	[24]	Доломит	20÷98	0,222	[30]
	1000	0,260	[24]	Каолин	0	0,237	[30]
	1200	0,273	[24]		400	0,323	[30]
				Лава вулканическая	23÷100	0,20	[30]
					31÷776	0,26	[30]
				Малахит	15÷99	0,176	[30]
				Слюда	20	0,21	[28]
				Тальк	59	0,208	[30]
				Уголь каменный	20÷1040	0,3145	[30]
				Шпатель	9÷98	0,193	[30]
				Шеелит	50	0,096	[30]
				Строительные материалы			
				Бетон	0	0,20	[32]

Наименование	$t, ^\circ\text{C}$	$C_p, \text{ кал/(г}\cdot\text{град)}$	Литература
Бумага, картон	—	0,36	[32]
Войлок	—	0,45	[28]
Глина	0	0,179	[30]
	400	0,270	[30]
	800	0,361	[30]
Дерево	20	~0,3	[30]
Известняк	0÷100	0,22	[34]
Кирпич красный	0÷100	0,21	[32]
» силикатный	20	0,20	[32]
Камень строительный	—	0,22	[34]
Мел	20	0,21	[28]
Мрамор	20	0,22	[32]
Песок речной	0÷100	0,19	[32]
Пробка	0÷100	0,42	[32]
Пеностекло	—	~0,18	[24]
Текстолит	20	~0,35	[24]
Фанера	0	0,60	[32]
Фибролит	—	0,55	[28]
Шлаки	—	~0,18	[28]
Огнеупоры			
Алундум	100	0,186	[29]
Глинозем	100	0,200	[29]
	500	0,239	[29]
	1000	0,261	[29]
	1500	0,275	[29]
Кирпич:			
динасовый	100	0,201	[29]
	1000	0,263	[29]
	1500	0,297	[29]
карборундовый	100	0,201	[29]
	1000	0,186	[29]
магнезитовый	100	0,222	[29]
	1000	0,277	[29]
	1500	0,296	[29]
хромитовый	100	0,170	[29]
	1000	0,220	[29]
шамотный	100	0,199	[29]
	1000	0,259	[29]
	1500	0,299	[29]
Фарфор технический	95	0,26	[32]
	15÷107	0,254	[29]
Уголь электродный	26÷76	0,168	[29]
	26÷538	0,199	[29]
	56÷1450	0,387	[29]
Керамика высокотемпературная			
Al_2O_3	100	0,206	[35]
	1700	0,280	[36]
	1800	0,299	[36]
AlN	20	0,189	[37]
B_4C	20	0,224	[37]
Be_3N_2	20	0,302	[37]
BeO	20	0,239	[36]
	100	0,299	[35]
	400	0,420	[38]
	800	0,492	[38]
	1000	0,498	[38]
	1200	0,530	[38]
$\alpha\text{-CaC}_2$	20	0,229	[37]
HfO_2	100	0,178	[36]
LaB_6	20	0,136	[37]
MgO	100	0,233	[35]

Наименование	$t, ^\circ\text{C}$	$C_p, \text{ кал/(г}\cdot\text{град)}$	Литература
MoSi_2	20	0,092	[37]
NbC	20	0,085	[37]
TaC	20	0,045	[37]
TaN	20	0,049	[37]
TiB	20	0,179	[37]
TiC	20	0,134	[37]
TiN	20	0,170	[37]
TiO_2	20	0,194	[36]
ThO_2	0÷100	0,056	[36]
UO_2	0÷200	0,056	[35]
VC	20	0,131	[37]
VN	20	0,139	[37]
WC	20	0,043	[37]
ZrO_2	20	0,120	[37]
	1000	0,16	[32]
	1400	0,176	[36]
ZrC	20	0,142	[37]

10.9. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ

При фазовом переходе I рода теплоемкость изменяется скачком, что связано с зародышевым характером процесса образования новой фазы. При этом скачок конечен, но в эксперименте он обычно маскируется более или менее острым пиком, площадь которого равна скрытой теплоте перехода.

При фазовом переходе II рода теплоемкость имеет характерный λ -образный вид, являющийся аномалией собственно теплоемкости, так как теплота фазового перехода II рода равна нулю. Температурный интервал, в котором проявляется λ -особенность теплоемкости, может быть очень узким (например, при переходе в сверхпроводящее состояние этот интервал равен примерно 10^{-12} град), и экспериментальные зависимости имеют иногда вид, сходный с аналогичными зависимостями для фазовых переходов I рода. Поведение теплоемкости вблизи фазовых переходов II рода показано на рис. 10.1—10.20.

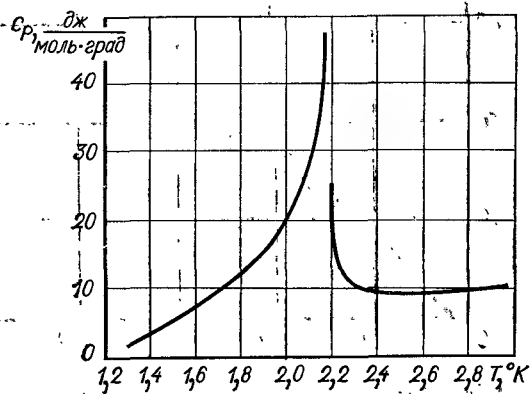


Рис. 10.1. Температурная зависимость теплоемкости ^4He вблизи перехода в сверхтекучее состояние [3].

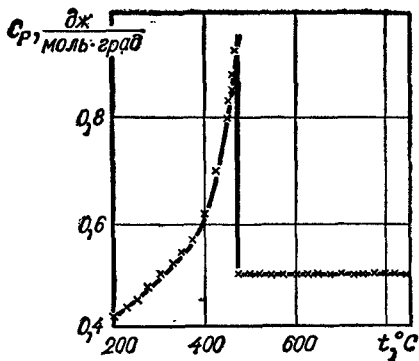


Рис. 10.2. Температурная зависимость теплоемкости β -латуни вблизи точки упорядочения [3].

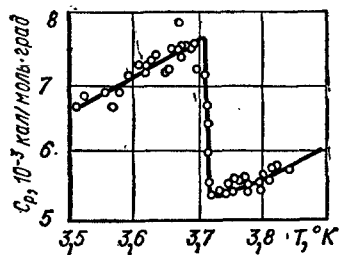


Рис. 10.3. Температурная зависимость теплоемкости Sn вблизи перехода в сверхпроводящее состояние [39].

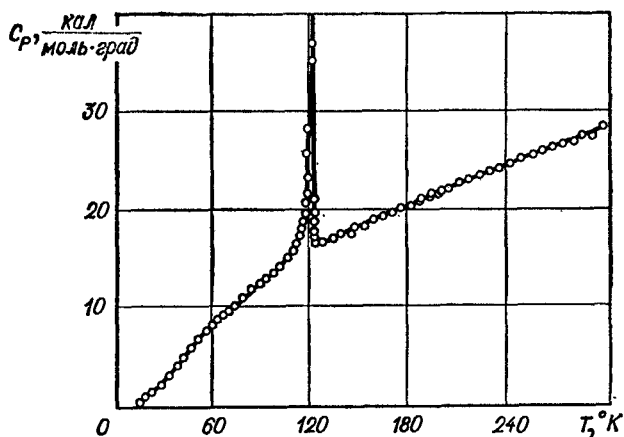


Рис. 10.4. Температурная зависимость теплоемкости $\text{K}_2\text{H}_2\text{PO}_4$ вблизи сегнетоэлектрического перехода [31].

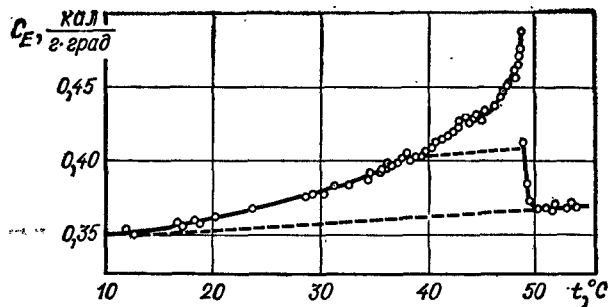


Рис. 10.5. Температурная зависимость теплоемкости C_E короткозамкнутого кристалла триглицинсульфата $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ вблизи сегнетоэлектрического перехода [40].

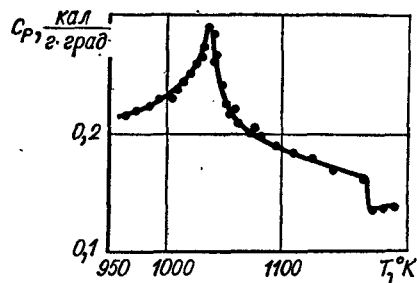


Рис. 10.6. Температурная зависимость теплоемкости Fe вблизи ферромагнитного перехода [41].

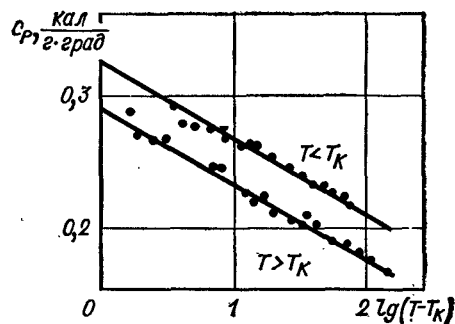


Рис. 10.7. Температурная зависимость теплоемкости Fe вблизи ферромагнитного перехода (в логарифмической шкале). T_K — температура перехода (точка Кюри) [41].

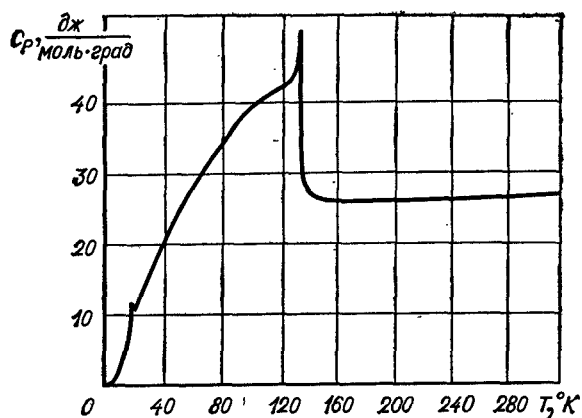


Рис. 10.8. Температурная зависимость теплоемкости
Но вблизи антиферромагнитного перехода [3].

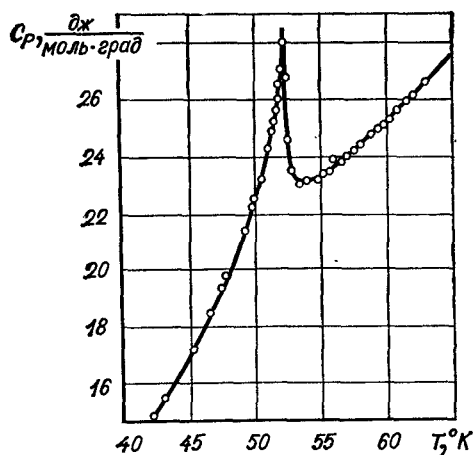


Рис. 10.11. Температурная зависимость теплоемкости NiCl_2 вблизи антиферромагнитного перехода [3].

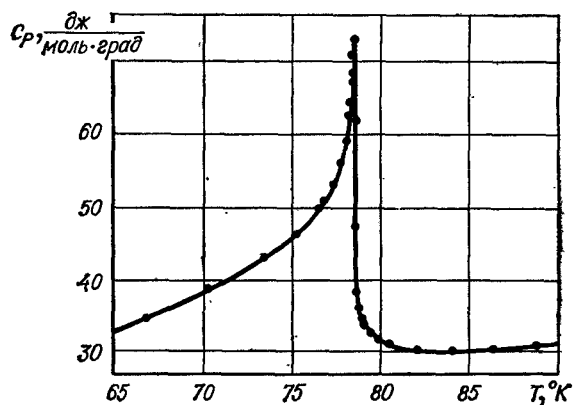


Рис. 10.9. Температурная зависимость теплоемкости FeF_2 вблизи антиферромагнитного перехода [3].

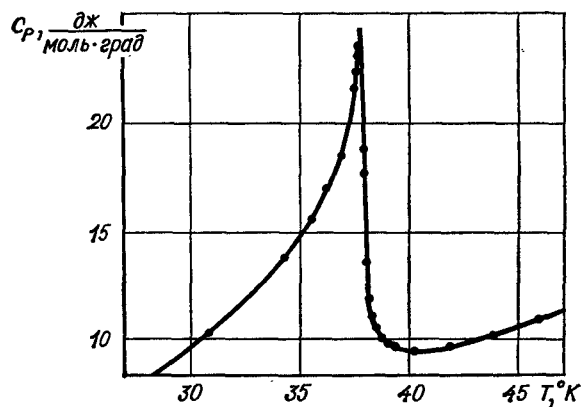


Рис. 10.12. Температурная зависимость теплоемкости CoF_2 вблизи антиферромагнитного перехода [3].

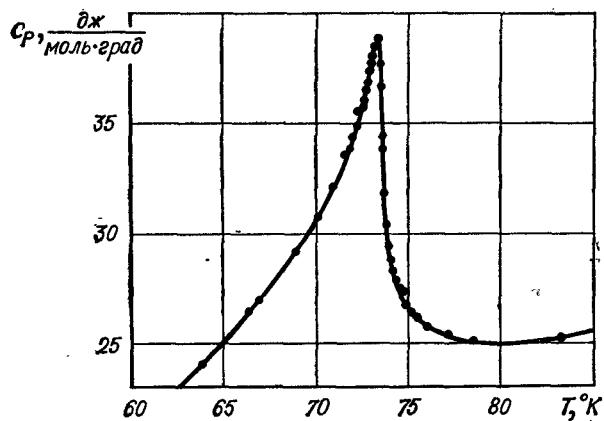


Рис. 10.10. Температурная зависимость теплоемкости NiF_2 вблизи антиферромагнитного перехода [3].

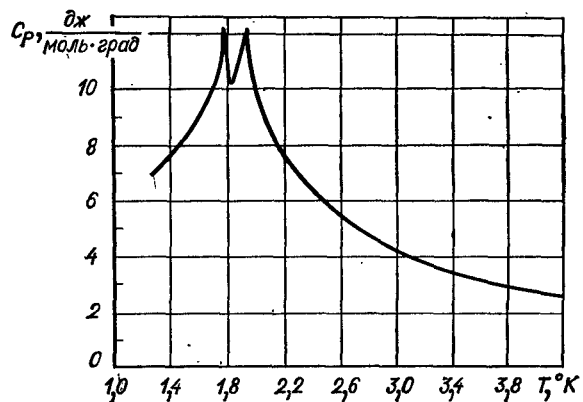


Рис. 10.13. Температурная зависимость теплоемкости MnCl_2 вблизи антиферромагнитных переходов II рода [3].

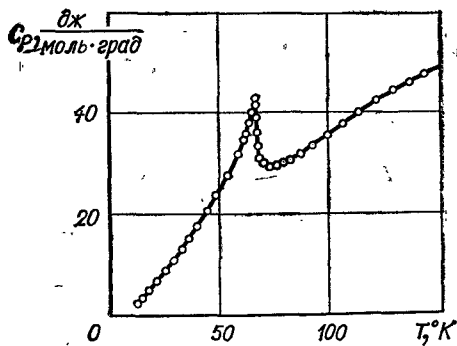


Рис. 10.14. Температурная зависимость теплоемкости MnF_2 вблизи антиферромагнитного перехода [3].

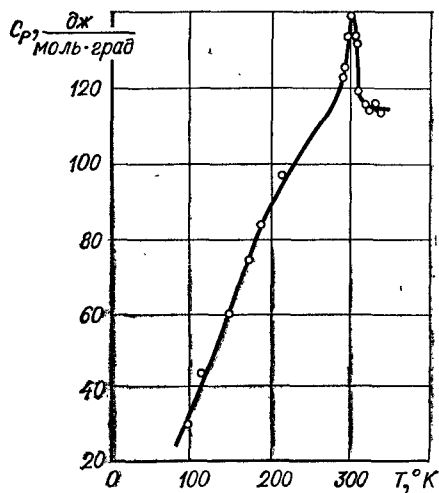


Рис. 10.15. Температурная зависимость теплоемкости Cr_2O_3 вблизи антиферромагнитного перехода [3].

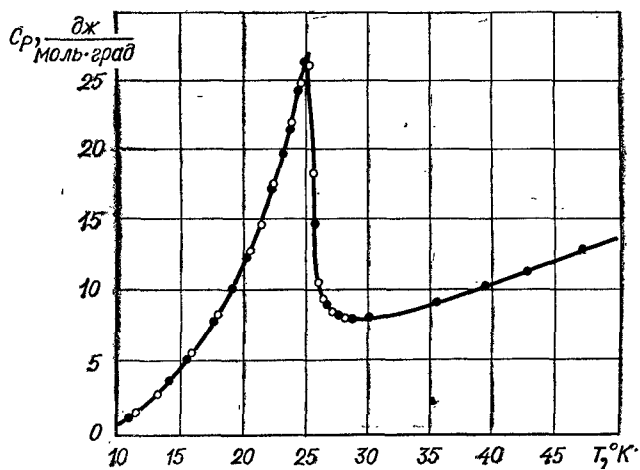


Рис. 10.16. Температурная зависимость теплоемкости NpO_2 вблизи антиферромагнитного перехода [3].

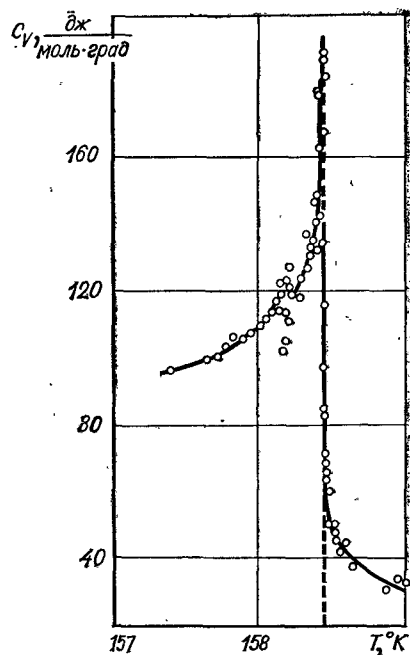


Рис. 10.17. Температурная зависимость теплоемкости O_2 вблизи критической точки парообразования [42].

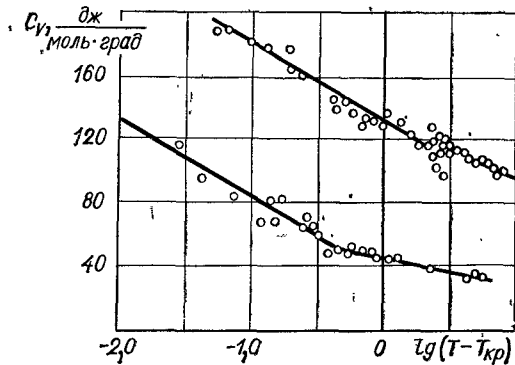


Рис. 10.18. Температурная зависимость теплоемкости O_2 вблизи критической точки парообразования (в логарифмической шкале) [42].

Скачок теплоемкости ΔC_p элементов
и неорганических соединений при фазовом переходе
I рода [3, 4]

Обозначения: ΔC_p — разность теплоемкостей C_p вещества в конечной и начальной фазах перехода; T — температура перехода; Пл — плавление; Исп — испарение; Тв — фазовый переход в твердом теле (изменение структуры). Давление 760 мм рт. ст.

Вещество	Переход	Т. °К	ΔC_p ,
			кал моль-град
Элементы			
Ag	Пл	1234,0	0,7
Ag	Пл	83,85	2,16
Ag	Исп	87,89	—5,08
Au	Пл	1336,16	—0,53
Au	Исп	2933	—2,0
Br ₂	Пл	265,9	2,0
Ca	Тв	723	—0,5
Cl ₂	Пл	172,16	2,75
Cl ₂	Исп	239,10	—8,76
Cu	Пл	1356,2	0,5
F ₂	Пл	52,20	1,86
F ₂	Исп	85,24	—4,27
Fe	Тв	1180	1,40
Fe	Тв	1673	1
Fe	Пл	1808	—2,8
Ga	Пл	309,94	0,38
H ₂	Пл	13,96	1,9
D ₂	Пл	18,72	2,2
Kr	Пл	115,95	2,01
Kr	Исп	119,93	—5,67
Na	Пл	371	0,51
Ne	Пл	24,55	2,42
Ne	Исп	27,07	—3,42
Ni	Тв	626	—0,71
Ni	Пл	1728	0,0
O ₂	Тв	23,66	0,3
O ₂	Тв	43,77	—0,14
O ₂	Пл	54,40	1,74
O ₂	Исп	90,19	—6,00
S	Тв	368,6	0,24
Se	Пл	392	1,6
Se	Тв	398	2,2
Se	Тв	423	0,2
Se	Пл	490,6	2,7
Te	Пл	723	2,0
Tl	Тв	508,3	0,18
Tl	Пл	576,8	0,43
Неорганические соединения			
AgBr	Пл	703	—3,6
AgCl	Пл	728	—2,31
AgNO ₃	Тв	433	—0,06
Ag ₂ S	Пл	483	4,5
Ag ₂ Se	Тв	452	1,2
AsF ₃	Тв	406	0,2
AuCd	Пл	267,21	7,3
AuSb ₂	Пл	900	—1,8
AuSn	Тв	628	2,46
AuZn	Пл	691	—0,2
BaCO ₃	Пл	1033	—2,6
C ₂ N ₂	Тв	1083	7,93
CO	Пл	245,32	5,29
CO	Тв	61,53	—3,2
CO	Исп	68,10	1,9

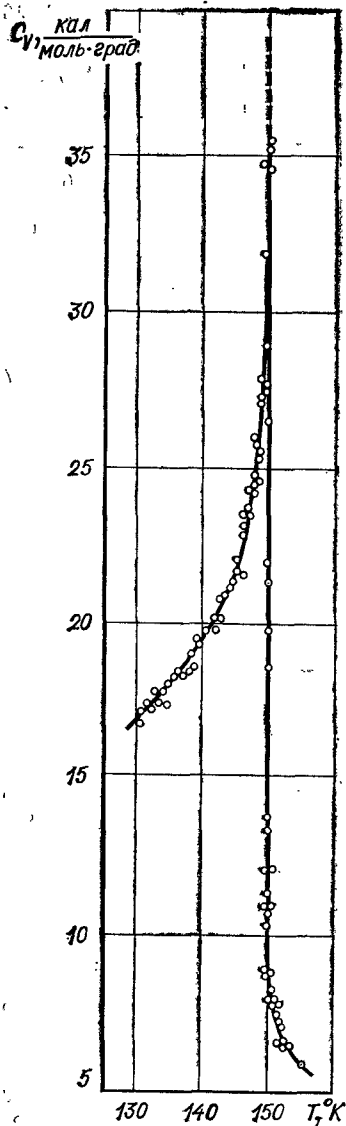


Рис. 10.19. Температурная зависимость теплоемкости Ag вблизи критической точки парообразования вдоль изохоры $\rho=0,521 \text{ г/см}^3$ [43].

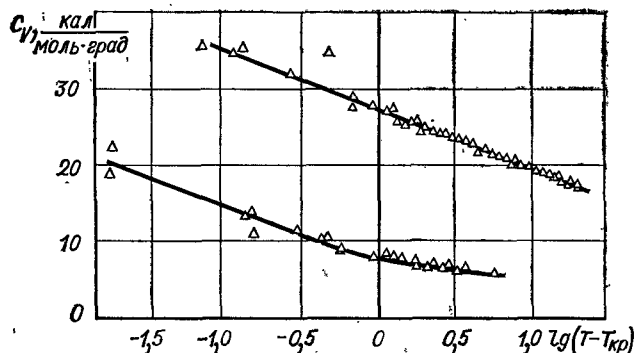


Рис. 10.20. Температурная зависимость теплоемкости Ag вблизи критической точки парообразования (в логарифмической шкале). $T_{кр}$ — критическая температура ($T_{кр} = 150,5^\circ \text{ К}$) [43]

Вещество	Переход	T, °K	ΔC_p
			$\frac{\text{кал}}{\text{моль} \cdot \text{град}}$
COS	Пл	134,34	5,6
CaC ₂	Тв	720	-1,20
CaTiO ₃	Тв	1530	-0,23
Cu ₂ S	Тв	376	0,2
Cu ₂ Se	Тв	383	0,5
FeCl ₂	Пл	950	3,63
FeS	Тв	411	-4,89
GeH ₄	Пл	107,26	2,0
HBr	Пл	186,28	1,64
	Исп	206,43	-7,37
HCN	Пл	259,92	1,7
HCl	Тв	98,38	1,15
	Пл	158,94	2,10
	Исп	188,11	-7,14
HF	Пл	190,09	2,55
	Исп	231,1	-10,9
HI	Пл	222,36	1,1
	Исп	237,80	-7,14
HNO ₃	Пл	231,56	10,55
HNO ₃ ·H ₂ O	Пл	235,53	22,51
H ₂ O	Пл	273,15	8,911
	Исп	373,15	-10,021
D ₂ O	Пл	276,98	9,48
H ₂ S	Тв	103,54	1,20
	Тв	126,24	-0,65
	Пл	187,63	1,59
	Исп	212,82	-8,34
H ₂ S ₂	Пл	183,4	12,9
H ₂ SO ₄	Пл	283,51	6,218
H ₂ SO ₄ ·H ₂ O	Пл	281,69	25,04
H ₂ Se	Тв	82,3	1,5
	Тв	172,54	-1,9
	Пл	207,43	1,95
KCl	Пл	1045	0,61
KF	Пл	1129	1,5
KNO ₃	Тв	400,9	2,9
	Пл	610	0,7
K ₂ SO ₄	Тв	856	-4,79
	Пл	1324	-6,49
LiNO ₃	Пл	527	0,45
NF ₃	Пл	66,36	0,647
NH ₃	Пл	195,43	5,11
NO	Пл	109,1	6,0
	Исп	121,3	11,8
N ₂ O	Пл	182,3	4,67
N ₂ O ₄	Пл	261,96	6,12
NaCl	Пл	1081	0,8
NaF	Пл	1268	0,65
NaNO ₃	Пл	583	0,3
NaOH	Пл	593	1,2
Na ₂ TiO ₃	Тв	5,60	-1,31
	Пл	1303	-1,2
SF ₆	Тв	94,26	-1,98
	Пл	222,5*	-1,7
SO ₂	Пл	197,68	4,50
	Исп	263,14	-11,84
SiH ₄	Пл	88,5	1,3
SiO ₂	Тв	846	-5,6
SnI ₄	Пл	417,7	5,7
TeCl ₄	Пл	497,3	21,9

Вещество	Переход	T, °K	ΔC_p
			$\frac{\text{кал}}{\text{моль} \cdot \text{град}}$
V ₂ O ₄	Тв	345	6,9
UF ₆	Пл	1815	10,1
	Пл	337,2	8,81

* При давлении 1700 мм рт. ст.

Таблица 10.17

Скачок теплоемкости ΔC_p органических соединений при фазовом переходе I рода [3, 4]

Пояснения те же, что и к табл. 10.16.

Формула	Название	Переход	T, °K	ΔC_p , $\frac{\text{кал}}{\text{моль} \cdot \text{град}}$
CH ₃ Cl	Хлорметан	Пл	175,44	1,5
CCl ₄	Четыреххлористый углерод	Пл	250,3	1,1
CFCl ₃	Фтортрихлорметан	Исп	296,8	-10,4
CH ₄ O	Метаноловый спирт	Пл	175,26	4,2
CH ₂ O ₂	Муравьиная кислота	Пл	281,46	8,8
C ₂ H ₆	Этан	Пл	89,89	2,2
		Исп	184,53	-11,5
C ₂ H ₅ Cl	Хлорэтан	Пл	134,83	1,52
C ₂ H ₄ Cl ₂	1,2-Дихлорэтан	Пл	237,5	5,9
C ₂ H ₅ Br	Бромэтан	Исп	311,5	-7
C ₂ H ₄ Br ₂	1,2-Дибромэтан	Тв	249,65	-11,1
		Пл	283,1	7,9
C ₂ H ₃ F ₂ Cl	1,1-Дифтор-1-хлорэтан	Пл	142,4	1,3
C ₂ F ₃ Cl ₃	1,1,2-Трифтор-1,2,2-трихлорэтан	Исп	320,4	-13,1
C ₂ F ₆	Этан шестифтористый	Тв	103,98	1,2
		Пл	173,10	1,78
C ₂ H ₆ O	Этиловый спирт	Пл	158,6	5,70
C ₂ H ₆ O	Диметиловый эфир	Пл	131,66	6,8
		Исп	248,34	-10,6
C ₂ H ₄ O	Ацетальдегид	Исп	293,3	-9,3
C ₂ H ₄ O	Этилена окись	Пл	160,71	3,45
		Исп	283,72	-9,7
C ₂ H ₄ O ₂	Уксусная кислота	Пл	289,77	9,4
C ₂ H ₆ S	Диметилсульфид	Пл	174,86	6,95

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stull D. R., Sinke G. C. Thermodynamic Properties of the Elements. Ser. 18, 1956.
2. Kelley K. K. Contribution to the Data on Theoretical Metallurgy. V. X, Washington, 1949.
3. Landolt-Börnstein. Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Geophysik, Astronomie, Technik. Aufl. 6. Bd 2. Teil 4. Springer-Verlag, Berlin, 1961.
4. Selected Values of Chemical Thermodynamic Properties. Circular of NBS No. 500. Washington, 1952.

5. Kubaschewski O., Evans E. L. Metallurgical Thermochemistry. London, 1951.
6. Dworkin A. S., Sasmor D. J., van Artsdalen E. R. J. Chem. Phys., 1954, v. 22, p. 837.
7. Ицкевич Е. С., Стрелков П. Г. «Ж. физ. химии», 1959, т. 33, с. 60.
8. King E. G. J. Amer. Chem. Soc., 1957, v. 79, p. 2399.
9. Hu J.-H., Johnston H. L. J. Amer. Chem. Soc., 1953, v. 75, p. 2471.
10. Coughlin J. P., King E. C., Bonnickson K. B. J. Amer. Chem. Soc., 1951, v. 73, p. 3891.
11. Shomate C. H., Cohen J. J. Amer. Chem. Soc., 1955, v. 77, p. 285.
12. King E. G. J. Amer. Chem. Soc., 1954, v. 76, p. 3289.
13. Астров Д. Н., Ицкевич Е. С. «Ж. физ. химии», 1955, т. 29, с. 424.
14. Orr R. L., Christensen A. U. J. Phys. Chem., 1958, v. 62, p. 124.
15. Evans W. H., Munson Th. R., Wagman D. D. J. Res. Nat. Bur. Stand., 1955, v. 55, p. 147.
16. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения. М., Госэнергоиздат, 1963. (Авт.: Малков М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г., Фрадков А. Б.)
17. Справочник химика. Под ред. Б. П. Никольского. Т. 1, 2. М.—Л., «Химия», 1963.
18. Gelles E., Pitzer K. S. J. Amer. Chem. Soc., 1953, v. 75, p. 5259.
19. Din F. Thermodynamic Functions of Gases. V. 2. London, 1956.
20. Tables of Thermal Properties of Gases. Circular of NBS No. 564. Washington, 1955.
21. Thermodynamic and transport properties of gases, liquids and solids. Purdue Univ., 1959. (Авт.: Evans W. H., Prosen E. J., Wagman D. D. e.a.)
22. Din F. Thermodynamic Functions of Gases. V. 1. London, 1956.
23. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963.
24. Справочник по машиностроительным материалам. Т. 1—4. М., Машгиз, 1959—1960.
25. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов. М., Физматгиз, 1959.
26. Щедров К. П., Гакман Э. Л. Жаропрочные материалы. М., Металлургиздат, 1956.
27. Славин Д. О., Штейман Е. Б. Металлы и сплавы в химическом машиностроении и аппаратостроении. М., Машгиз, 1951.
28. Теплофизические свойства веществ. Под ред. Н. Б. Варгафтика. М., Госэнергоиздат, 1956.
29. Техническая энциклопедия. Справочник. Т. VII. М., ОГИЗ, 1931.
30. Smithsonian Physical Tables. 9th ed. Washington, 1954.
31. Иона Ф., Шираие Д. Сегнетоэлектрические кристаллы. Пер. с англ. М., «Мир», 1965.
32. Теплофизический справочник. Под ред. С. Г. Герасимова. Т. 1. М., Госэнергоиздат, 1957.
33. Скотт Р. Б. Техника низких температур. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
34. Чудновский А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М., Физматгиз, 1962.
35. Черепанов А. М., Тресвятский С. Т. Высокоохлаждаемые материалы и изделия из окислов. М., Металлургиздат, 1964.
36. Самсонов Г. В., Кислый П. С. Высокотемпературные неметаллические термпары и наконечники. Киев, «Наукова думка», 1956.
37. Самсонов Г. В. Тугоплавкие соединения. М., Металлургиздат, 1963.
38. Беляев Р. А. Окись бериллия. М., Госатомиздат, 1962.
39. Шенберг Д. Сверхпроводимость. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1955.
40. Смоленский Г. А., Крайник Н. Н. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики. М., «Наука», 1968.
41. Крафтвахер Я. А., Ромашкина Т. Ю. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 2533.
42. Воронель А. В., Чашкин Ю. Р., Попов В. А., Симкин В. Г. «Ж. эксперим. и теор. физ.», 1963, т. 45, с. 828.
43. Багацкий М. И., Воронель А. В., Гусак В. Г. «Ж. эксперим. и теор. физ.», 1962, т. 43, с. 728.

ГЛАВА II

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ, ПЛАВЛЕНИЕ И КИПЕНИЕ

II.1. ТЕМПЕРАТУРА И СКРЫТАЯ ТЕПЛОТА ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

Термодинамическими фазами называются термодинамические состояния вещества, которые могут равновесно существовать, находясь в контакте друг с другом; переход вещества из одной фазы в другую называется *фазовым переходом*. В отсутствие внешних полей термодинамические фазы изотропны по всем свойствам, и для соприкасающихся фаз выполняются равенства химических потенциалов компонент, температур и давлений, которые называются *температурой и давлением фазового перехода*.

Различают фазовые переходы I и II рода.

Фазовые переходы I рода характеризуются непрерывностью термодинамического потенциала Φ и разрывом его первой производной в точке перехода. При фазовом переходе I рода происходит поглощение или выделение теплоты, измеряемое скачком энтальпии H и называемое *скрытой теплотой перехода* $L = \Delta H$. Теплоту перехода относят к 1 г или 1 моль вещества и называют соответственно *удельной* или *мольной теплотой перехода*. К фазовым переходам I рода относятся, в частности,

все переходы, связанные с изменением агрегатного состояния вещества, и, в зависимости от названия перехода, теплота перехода называется *теплотой плавления* $L_{пл}$, *испарения* в точке кипения $L_{исп}$ или *сублимации* (возгонки) $L_{субл}$. Давление и температура фазового перехода I рода связаны уравнением Клапейрона—Клаузуса

$$dP/dT = L/(T \cdot \Delta V),$$

где P — давление; T — температура; ΔV — изменение объема вещества в точке перехода.

Фазовые переходы II рода характеризуются непрерывностью в точке перехода термодинамического потенциала Φ и его первых производных и разрывом вторых производных Φ . При этом переходе не происходит тепловыделения и теплота перехода II рода равна нулю. Фазовыми переходами II рода являются переходы вещества в сверхпроводящее, сегнетоэлектрическое, ферромагнитное и т. п. состояния в отсутствие внешних полей (электрических, магнитных). В противном случае те же переходы могут стать переходами I рода: теплота перехода при этом затрачивается на противодействие внешним силам.

Температура t и скрытая теплота ΔH фазовых переходов элементов и неорганических соединений при давлении 760 мм рт. ст.

Обозначения фазовых переходов I рода: Тв — фазовый переход между твердыми фазами различной структуры; Пл — переход твердое тело — жидкость (плавление); Исп — переход жидкость — пар (испарение); Субл — переход твердое тело — пар (сублимация).

Обозначения фазовых переходов II рода: Ст — переход в сверхтекучее состояние; Свп — переход в сверхпроводящее состояние; Сэ и Асэ — сегнето- и антисегнетоэлектрические переходы; Фм и АФм — ферро- и антиферромагнитные переходы. В скобках приведены расчетные значения.

Вещество	Переход	t , °C	ΔH , кДж/моль	Литература
Ac	Пл	(1197)	(14,2)	[1]
	Исп	(3327)	(397)	[1]
Ag	Пл	960,8	11,27	[1, 2]
	Исп	2212	254,0	[1]
AgBr	Тв	254	—	[3]
	Пл	430	9,16	[4]
	Исп	1502	198	[1]
AgCl	Пл	455,5	12,73	[1]
	Исп	1547	199	[1]
AgI	Тв	150	6,15	[3]
	Пл	557	9,41	[4]
	Исп	1506	143,9	[5]
AgNO ₃	Тв	160	2,55	[3]
	Пл	210	11,54	[3]
Ag ₂ S	Тв	179	4,39	[1]
	Тв	586	—	[6]
	Пл	842	14,05	[4]
Ag ₂ SO ₄	Тв	412	7,9	[2]
	Пл	657	17,9	[3]
Al	Свп	-272,01	0,00	[7]
	Пл	660,1	10,7	[1, 8]
	Исп	2447	293,7	[1]
AlBr ₃	Пл	97,5	11,3	[1]
	Исп	256,2	23,5	[3]
AlCl ₃	Пл*	192	34,5	[2]
AlF ₃	Тв	454	0,63	[1]
AlNi	Пл	1638	—	[6]
Al ₂ O ₃	Тв	975	86,2	[1, 9]
	Пл	2045	109	[9]
	Исп	3530	—	[1]
AlSb	Пл	1080	65,1	[9]
Am	Пл	1200	—	[10]
	Исп	3153	238	[1]
Ar	Пл	-189,30	1,176	[1]
	Исп	-185,87	6,519	[1]
As	Пл	814	—	[11]
	Субл	615	—	[11]
AsF ₃	Пл	-5,95	10,40	[1]
	Исп	58	29,7	[9]
AsH ₃	Тв	-167,50	0,548	[1]
	Пл	-116,92	1,195	[1]
	Исп	-62,43	16,686	[1]
At	Пл	(300)	(23,8)	[1]
	Исп	(377)	(90,4)	[1]

* При $P = 1625$ мм рт. ст.

Вещество	Переход	t , °C	ΔH , кДж/моль	Литература
Au	Пл	1063	12,77	[1, 8]
	Исп	2700	324,4	[1]
AuCu	Тв	416	3,14	[6]
AuSb ₂	Тв	355	4,68	[3, 2]
	Тв	405	0,42	[3, 2]
B	Пл	2030	22,2	[1]
	Исп	3900	540	[1]
	Субл	25,0	582	[1]
BBr ₃	Пл	-47,5	—	[1]
	Исп	91,2	30,5	[5]
BCl ₃	Пл	-107,2	—	[1]
	Исп	12,4	12,77	[1]
B ₂ Cl ₄	Пл	-92,94	10,7	[1]
	Исп	65,5	33,6	[1]
BF ₃	Тв	-131,0	4,24	[1]
	Пл	-99,9	18,9	[1]
	Исп	-92,94	10,7	[1]
B ₂ F ₄	Пл	-56,0	—	[1]
	Исп	-34,0	28,0	[1]
B ₂ H ₆	Пл	-164,8	4,47	[1]
	Исп	-92,52	14,28	[1]
B ₄ H ₁₀	Пл	-120,0	—	[1]
	Исп	16	27,1	[5]
BN	Исп	52	26,4	[1]
B ₂ O ₃	Пл	450	23,0	[1, 2]
	Исп	2247	—	[1, 2]
Ba	Тв	370	0,59	[1]
	Пл	710	7,66	[1, 11]
	Исп	1637	150,9	[1, 2]
BaCO ₃	Тв	806	16,2	[1]
	Тв	968	2,9	[1]
BaCl ₂	Тв	920	—	[9]
	Пл	960	22,47	[4]
	Исп*	1189	238	[1]
BaF ₂	Пл	1290	12,5	[4, 9]
	Исп	2260	292	[1]
BaO	Пл	1923	57,7	[1]
	Исп	2700	—	[1]
BaSO ₄	Тв	1150	—	[9]
	Пл	1350	40,6	[4]
BaTiO ₃	Сэ	-80	0,00	[7]
	Сэ	5	0,00	[7]
	Сэ	120	0,00	[7]
Be	Пл	1283	12,5	[1]
	Исп	2477	294	[1]
BeBr ₂	Пл	488	18,8	[1, 6]
BeCl ₂	Пл	410	12,6	[6]
	Исп	547	105	[2]
BeF ₂	Пл	545	—	[1]
	Исп	1159	212,9	[1]
BeO	Пл	2550	71,1	[1]
	Исп	4120	—	[6]
Bi	Пл	271,3	10,9	[1]
	Исп	1559	151,5	[1]
BiBr ₃	Тв	155	—	[1]
	Пл	218	—	[1]
	Исп	461	75,4	[5]
BiCl ₃	Пл	244	10,9	[4]
	Исп	441	72,61	[5]
BiNa ₃	Пл	775	69,5	[1, 6]

* При $P = 6,3$ мм рт. ст.

Вещество	Переход	$t, ^\circ\text{C}$	$\Delta H, \text{кДж/моль}$	Литература
Bi_2O_3	Тв	704	—	[6]
	Пл	817	28,5	[4]
Bi_3TeI_2	Пл	213	7,32	[1]
Br	Пл	-7,3	10,58	[1, 2]
	Исп	58,2	30,0	[1]
BrCl	Пл	-60,5	7,3	[1]
	Исп	40,76	30,6	[1]
BrF	Пл	-33	—	[1]
	Исп	20	25,1	[1]
BrF_3	Пл	8,78	12,03	[1]
	Исп	125,75	47,57	[1]
C_2N_2	Пл	-27,88	8,11	[1]
	Исп	-21,2	23,33	[1]
CO	Тв	-211,6	0,633	[1]
	Пл	-205,1	0,836	[1]
	Исп	-191,5	6,04	[1]
CO_2	Пл*	-56,6	7,95	[1]
	Субл	-78,50	—	[12]
COS	Пл	-138,8	4,727	[1]
	Исп	-50,28	18,51	[1]
CP	Пл	-110	10,9	[2]
CS_2	Пл	-111,6	4,39	[1, 12]
	Исп	46,25	26,77	[2]
Ca	Тв	440	1,0	[1]
	Пл	850	8,66	[1]
	Исп	1487,1	150,0	[1]
CaC_2	Тв	447	5,56	[1]
	Пл	2300	—	[1]
CaCl_2	Пл	782	29,36	[1]
	Исп	2000	230	[6]
CaF_2	Тв	1151	4,77	[1]
	Пл	1418	29,7	[1]
	Исп	2500	317	[1]
CaO	Пл	2603	51,2	[4]
	Исп	3570	—	[1]
CaSO_4	Пл	1193	—	[1]
	Исп	1397	28,0	[4]
CaSi_2	Пл	1220	—	[1]
CaSiO_3	Тв	675	—	[1]
	Тв	1190	—	[1]
	Тв	1243	1,84	[1]
	Пл (α)	1512	—	[4]
	Тв	1983	—	[1]
	Пл (γ)	2130	14,18	[1]
CaTiO_3	Тв	1257	2,30	[1]
Cd	Свп	-272,61	0,00	[7]
	Пл	321,03	6,40	[1, 12]
	Исп	765	99,87	[5]
CdBr_2	Пл	568	20,9	[4]
	Исп	844	115	[1]
CdCl_2	Пл	564	48,58	[1]
	Исп	960	124,3	[1]
CdF_2	Пл	1110	22,6	[4]
	Исп	1748	214	[1]
CdSb	Пл	456	32,04	[1]
Ce	Тв	-133	—	[2]
	Тв	393	—	[2]
	Тв	440	—	[2]
	Пл	777	12,9	[1]
	Исп	2900	314	[1]

Вещество	Переход	$t, ^\circ\text{C}$	$\Delta H, \text{кДж/моль}$	Литература
CeCl_3	Пл	822	38,5	[1]
	Исп	1925	200,9	[1]
Cl_2	Пл	-101	6,406	[1]
	Исп	-34,01	20,41	[1]
ClF	Пл	-154	—	[1]
	Исп	-100,8	24,0	[1]
ClF_3	Тв	-82,65	1,508	[1]
	Пл	-76,31	7,612	[1]
	Исп	11,76	27,53	[1]
Cl_2O	Пл	-116	—	[1]
	Исп	2,0	25,9	[1]
ClO_2	Пл	-59	—	[1]
	Исп	11,0	30	[1]
Co	ФМ	1127	0,00	[7]
	Пл	1492	15,3	[4, 10]
	Исп	2255	383	[1, 10]
CoCl_2	Афм	248,3	0,00	[7]
	Пл	740	31,0	[1, 4]
	Исп	1053	144,9	[1]
CoO	Афм	1,78	0,00	[7]
	Пл	1800	40,2	[1]
CoSi_2	Свп	-271,88	0,00	[7]
Cr	Афм	200	0,00	[7]
	Тв	1840	1,46	[1]
	Пл	1903	14,6	[1, 2]
	Исп	2642	349	[1]
CrCl_2	Пл	815	32,2	[2]
	Исп	1300	197	[6]
Cr_2O_3	Афм	32,8	0,00	[1, 7]
	Пл	2440	—	[1]
CrO_2	ФМ	107	0,00	[7]
Cs	Пл	28,64	2,18	[1]
	Исп	685	65,9	[1]
CsBr	Пл	636	7,1	[1]
	Исп	1300	150,5	[5]
CsCl	Тв	445	7,5	[1]
	Пл	642	15,06	[5]
	Исп	1300	149,3	[5]
CsH_2PO_4	Сэ	-113	0,00	[7]
CsOH	Тв	223	7,36	[1]
	Пл	272,3	6,73	[1]
Cu	Пл	1083,0	13,01	[1, 12]
	Исп	2595	304	[1]
CuBr	Тв	380	5,9	[6]
	Тв	465	2,9	[6]
	Пл	488	9,6	[2, 6]
	Исп	1318	140	[6]
CuCl	Пл	430	10,0	[4]
	Исп	1690	165,7	[6]
Cu_2O	Пл	1230	56,0	[4]
CuS	Свп	-271,55	0,00	[7]
Cu_2S	Тв	103	5,60	[4]
	Тв	350	0,837	[6]
	Пл	1125	23,0	[4]
$\alpha\text{-D}_2$	Пл	-254,50	0,197	[1]
	Исп	-249,48	1,226	[1]
$\alpha\text{-D}_2$	Пл	-254,52	0,197	[1]
	Исп	-249,56	1,223	[1]
DF	Пл	-83,6	—	[1]
	Исп	18,36	—	[1]
D_2O	Пл	3,76	6,280	[1]
	Исп	101,4	41,69	[2]
DT	Пл	-253,5	—	[1]
	Исп	-248,9	—	[1]

* При $P = 5,28 \text{ атм.}$

Вещество	Пере- ход	t , °C	ΔH , кДж/моль	Литера- тура	Вещество	Пере- ход	t , °C	ΔH , кДж/моль	Литера- тура
Dy	Фм	—168	0,00	[7]	HBr	Пл	—86,9	2,405	[1]
	Пл	1500	—	[1]		Исп	—66,7	17,6	[1]
	Исп	2600	—	[11]	HCN	Пл	—13,3	8,41	[1]
Er	Тв	—189	—	[1]		Исп	25,6	25,22	[1]
	Пл	1497	—	[11]	HCl	Тв	—174,7	1,189	[1]
	Исп	2900	—	[11]		Пл	—114,2	1,992	[1]
Eu	Пл	826	—	[1]		Исп	—85,02	16,15	[1]
	Исп	1489	—	[1]	HF	Пл	—83,36	3,928	[1]
F	Пл	—218,0	1,556	[1]		Исп*	19,46	7,489	[1]
	Исп	—188,1	6,538*	[1]	HI	Тв	—247	—	[1]
F ₂ O	Пл	—223,8	—	[1]		Тв	—203,0	0,078	[1]
	Исп	—144,8	11,09	[1]		Тв	—147,6	0,805	[1]
Fe	Фм	760	0,00	[3]		Пл	—50,79	2,87	[1]
	Тв	906	0,878	[3]		Исп	—35,34	19,76	[1]
	Тв	1401	0,46	[3]	HNO ₃	Пл	—41,59	10,47	[1]
	Пл	1535	15,5	[5]	HNO ₃ ·3H ₂ O	Пл	—18,47	29,09	[1]
FeCO ₃	Афм	—216	0,00	[7]	H ₃ PO ₄	Пл	42,35	10,5	[2]
FeCl ₂	Афм	—249,7	0,00	[7]	H ₂ S	Тв	—169,59	1,51	[1]
	Пл	677	43,0	[1]		Тв	—146,88	0,455	[1]
	Исп	1012	125,5	[1]		Пл	—85,6	2,378	[1]
FeCl ₃	Пл	303,9	43,1	[1]		Исп	—60,38	18,67	[1]
	Исп	319	—	[5]	H ₂ SO ₄	Пл	10,38	10,71	[1]
FeF ₂	Афм	—194,8	0,00	[1]	H ₂ SO ₄ ·2H ₂ O	Пл	—39,46	18,24	[1]
	Пл	1100	—	[6]	H ₂ Se	Тв	—190,9	1,57	[1]
FeO	Афм	—75	0,00	[7]		Тв	—100,6	1,12	[1]
Fe ₂ O ₃	Тв	677	0,67	[1]		Пл	—65,73	2,51	[1]
	Тв	767	—	[1]	He	Ст	—270,97	0,00	[1, 12]
Fe ₃ O ₄	Тв	627	—	[1]		Пл ^{2*}	—269,7	0,0209	[1]
	Пл	1594	138	[1]		Исп	—268,94	0,0837	[1, 12]
FeS	Тв	138	2,38	[1]	³ He	Исп ^{3*}	—271,5	0,04785	[1]
	Тв	325	0,50	[1]	Hf	Свп	—272,80	0,00	[7]
	Пл	1195	32,34	[1]		Тв	1550	—	[1]
Fe ₂ SiO ₄	Пл	1217	92,17	[1]		Пл	2220	21,8	[1]
Ga	Свп	—272,08	0,00	[7]		Исп	5200	661	[1]
	Тв ^{2*}	2,4	2,13	[1]	Hf (BH ₄) ₄	Пл	29,0	14,2	[1]
	Пл	29,78	5,586	[1]		Исп	118	40,2	[1]
	Исп	2227	254	[1]	HfO ₂	Пл	2790	—	[1]
GaCl ₃	Пл	77,0	10,9	[1]	Hg	Свп	—269,0	0,00	[7]
	Исп	200,0	23,9	[1]		Пл	—38,86	2,295	[1]
Gd	Фм	16	0,00	[7]		Исп	356,73	59,11	[1]
Ge	Пл	937,2	29,8	[1]	HgCl ₂	Пл	277	17,36	[4]
	Исп	2830	334	[1]		Исп	304	58,89	[3]
GeCl ₄	Пл	—49,5	—	[1]	Hg ₂ Na	Пл	350	26,3	[1]
	Исп	83,1	29,7	[1, 5]	HgS	Тв	386	4,2	[2]
GeH ₄	Тв	—200,0	0,547	[1]	Ho	Афм	—141,6	0,00	[1]
	Тв	—196,6	0,542	[1]		Пл	1461	—	[11]
	Пл	—165,9	0,837	[1]		Исп	2600	—	[11]
	Исп	—88,35	14,058	[1]	I	Пл	113,6	15,77	[3]
GeO ₂	Тв	707	17,6	[1]		Исп	182,8	41,71	[1, 3]
	Пл	1115	43,9	[9]	ICl	Пл	27,3	11,2	[1]
<i>n</i> -H ₂	Пл	—259,20	0,117	[1]	In	Свп	—269,88	0,00	[7]
	Исп	—252,76	0,904	[1, 12]		Пл	156,61	3,27	[1, 12]
<i>n</i> -H ₂	Пл	—259,27	0,117	[1]		Исп	2075	226	[1, 11]
	Исп	—252,88	0,900	[1, 12]	InCl	Тв	120	6,91	[1]
HD	Пл	—256,5	0,1548	[1]		Пл	225	17,2	[1]
	Исп	—251,02	1,109 ^{3*}	[1]	InSb	Исп	609	89,9	[1]
HT	Пл	—254,7	—	[1]		Пл	525	25,5	[1]
	Исп	—249,6	—	[1]	Ir	Пл	2443	—	[1, 12]
HBr	Тв	—184,0	0,265	[1]		Исп	4350	—	[1]
	Тв	—160,0	0,330	[1]	IrF ₆	Пл	44	8,4	[6]
	Тв	—156,0	0,489	[1]		Исп	53	36,0	[6]

* При $P = 738$ мм рт. ст.** При $P = 8,8 \cdot 10^6$ мм рт. ст.*** При $P = 93$ мм рт. ст.* При $P = 741,4$ мм рт. ст.** При $P = 103$ атм.*** При $P = 152,04$ мм рт. ст.

Вещество	Переход	t , °C	ΔH , кДж/моль	Литература
K	Пл	63,4	2,33	[1, 2]
	Исп	753,8	77,5	[1]
KBr	Пл	732	24,8	[1]
	Исп	1303	155,1	[5]
KCl	Пл	772	25,5	[2]
	Исп	1413	161,5	[1]
KD ₂ PO ₄	Сэ	-60	0,00	[7]
KF	Пл	857	27,2	[4]
	Исп	1502	172,7	[5]
KH ₂ PO ₄	Сэ	-150	0,00	[7]
KNO ₃	Тв	127,9	5,10	[1]
	Пл	334,3	9,62	[1]
KNbO ₃	Сэ	435	0,00	[7]
KO ₂	Тв	-79,7	—	[1]
	Пл	380	—	[1]
KOH	Тв	249	6,36	[1]
	Пл	410	7,5	[1]
	Исп	1327	129	[1]
K ₂ SO ₄	Тв	583	8,11	[1]
	Пл	1069	36,64	[1]
KTaO ₃	Сэ	-260	0,00	[7]
K ₂ WO ₄	Тв	350	—	[2]
	Пл	930	18,4	[2]
Kr	Пл	-157,2	1,636	[1, 10]
	Исп	-153,2	9,029	[1]
La	Свп	-268,44	0,00	[7]
	Тв	-163	—	[1]
	Тв	548	—	[1]
	Тв	709	—	[1]
	Пл	920	11,3	[1]
	Исп	3370	400	[1]
LaCl ₃	Пл	872	43,1	[9]
	Исп	1945	224	[1]
Li	Тв	-196	—	[1]
	Пл	180,5	3,01	[1]
	Исп	1317	148,1	[1]
LiBr	Пл	546	12,95	[1]
	Исп	1310	148,1	[1, 5]
LiCl	Пл	614	13,4	[4]
	Исп	1382	150,5	[5]
LiF	Пл	848	26,4	[2, 6]
	Исп	1681	213,3	[5]
LiH	Пл	688	29,3	[1]
LiNO ₃	Пл	250	25,5	[4]
Li ₂ O	Пл	1727	75,3	[1]
	Исп	2327	—	[1]
Li ₂ WO ₄	Пл	742	28,0	[1, 6]
Lu	Пл	1652	—	[11]
	Исп	3327	—	[11]
Mg	Пл	649,5	8,95	[1]
	Исп	1120	131,8	[2]
MgCl ₂	Пл	714	43,1	[1]
	Исп	1418	136,8	[5]
MgF ₂	Пл	1263	58,1	[1]
	Исп	2260	292	[1]
MgO	Пл	2802	77,4	[1, 4]
MgSO ₄	Пл	1127	14,6	[4]
Mn	Афм	-170	0,00	[7]
	Тв	727	2,24	[1]
	Тв	1101	2,28	[1]
	Тв	1137	1,8	[1]
	Пл	1244	14,6	[2]
	Исп	2095	224,7	[2]

Вещество	Переход	t , °C	ΔH , кДж/моль	Литература
MnCl ₂	Пл	650	37,6	[1]
	Исп	1231	149	[1]
MnF ₂	Афм	-206,7	0,00	[1, 7]
	Пл	930	—	[6]
MnO	Афм	-151	0,00	[1, 7]
	Пл	1780	54,4	[1]
MnSb	Фм	314	0,00	[7]
Mo	Пл	2625	27,6	[1, 10]
	Исп	4800	594	[1]
MoB	Свп	-268,75	0,00	[7]
Mo ₂ C	Пл	2672	—	[1]
MoF ₆	Пл	17,5	9,2	[1, 2]
	Исп	35	26,2	[1]
MoN	Свп	-261,15	0,00	[7]
MoC ₃	Пл	795,2	52,5	[1]
N ₂	Тв	-237,65	0,23271	[1, 12]
	Пл	-210,01	0,72074	[1]
	Исп	-195,83	5,577	[1]
¹⁵ N ₂	Тв	-237,47	0,23686	[1]
	Пл	-209,96	0,72053	[1]
	Исп	-195,76	5,592	[1]
NF ₃	Тв	-216,5	1,514	[1]
	Пл	-206,8	0,398	[1]
	Исп	-129,0	11,58	[1]
N ₂ F ₄	Исп	-73	13,27	[1]
NH ₃	Пл	-77,73	5,65	[1]
	Исп	-33,41	23,35	[1]
N ₂ H ₄	Пл	1,54	12,66	[1]
	Исп	113,5	41,8	[1]
NH ₄ Cl	Тв	-30,6	1,1	[1]
	Пл*	520	—	[1]
(NH ₄) ₂ H ₂ PO ₄	Асэ	-125	0,00	[7]
(NH ₄)NO ₃	Тв	-16	0,54	[1]
	Тв	32,1	1,59	[1]
	Тв	84,2	1,34	[1]
	Тв	125,2	4,22	[1]
	Пл	169,6	6,40	[1]
NO	Пл	-163,60	2,299	[1]
	Исп	-151,73	13,774	[1]
N ₂ O	Пл	-90,91	6,540	[1]
	Исп	-88,56	16,552	[1]
N ₂ O ₄	Пл	-11,25	14,65	[1]
	Исп	21,10	38,12	[1]
Na	Пл	97,82	2,602	[2]
	Исп	890	89,04	[1]
NaCl	Пл	800	28,8	[4]
	Исп	1461	170	[1]
NaF	Пл	1012	33,60	[1]
	Исп	1704	209	[5, 6]
NaNO ₃	Тв	275	—	[1]
	Пл	306	14,6	[1]
NaNbO ₃	Асэ	520	0,00	[7]
Na ₂ O	Пл	920	46,9	[1]
NaOH	Тв	292,8	6,36	[1]
	Пл	319,1	6,36	[1]
	Исп	1390	144,3	[5, 6]
NaPO ₃	Тв	577	3,60	[1]
Na ₂ SO ₄	Тв	177	3,10	[1]
	Тв	241	7,03	[1]
	Пл	884	28,7	[1]
Na ₂ TiO ₃	Тв	287	1,7	[1]
	Пл	1030	70,3	[1]

* При $P = 31,4$ атм.

Вещество	Переход	t , °C	ΔH , кДж/моль	Литература	Вещество	Переход	t , °C	ΔH , кДж/моль	Литература
NaTaO ₃	Асэ	475	0,00	[7]	PbTiO ₃	Сэ	490	0,00	[7]
Na ₂ WO ₄	Тв	587,6	31,0	[1]	PbZrO ₃	Асэ	233	0,00	[7]
	Тв	588,8	4,2	[1]	Pd	Пл	1552	17,2	[4, 12]
	Пл	695,5	23,8	[1]		Исп	3560	—	[2]
Nb	Свп	—263,93	0,00	[7]	PdCl ₃	Пл	678	40,6	[1]
	Пл	2487	26,8	[1]	Pm	Пл	1035	—	[11]
	Исп	4900	696	[1]		Исп	2730	—	[11]
NbB	Свп	—267,15	0,00	[7]	Po	Пл	954	—	[1]
NbC	Свп	—262,85	0,00	[7]		Исп	962	102,9	[1]
NbF ₅	Пл	78,9	36,0	[1]	Pr	Пл	919	11,3	[1, 2]
	Исп	233,3	52,3	[1]		Исп	3127	—	[11]
NbN	Свп	—258,3	0,00	[7]	Pt	Пл	1769	21,7	[2]
Nb ₂ O ₅	Тв	800	—	[6]		Исп	4310	447	[5]
	Тв	1100	—	[6]	Pu	Пл	639,5	—	[11]
	Пл	1512	102,9	[1]		Исп	3235	—	[11]
Nd	Тв	869	—	[1]	PuCl ₃	Пл	760	63,6	[1]
	Пл	1019	14,6	[1]		Исп	1767	195,6	[1]
	Исп	3110	—	[10]	PuF ₃	Пл	1169	33	[1]
Ne	Пл	—248,60	0,335	[1]	PuF ₆	Пл	50,7	19,7	[1]
	Исп	—246,05	1,760	[1, 12]		Исп	62,3	31,0	[1]
Ni	Фм	354	0,00	[7]	Ra	Пл	700	—	[1]
	Пл	1453	17,8	[1, 12]		Исп	1536	—	[10]
	Исп	2800	380,6	[2]	Rb	Пл	38,7	2,20	[1]
NiCl ₂	Афм	—223,6	0,00	[7]		Исп	701	69,20	[1]
	Пл	1030	77,28	[1]	RbCl	Пл	717	18,40	[4]
NiO	Афм	250	0,00	[1]		Исп	1381	154,4	[1]
	Пл	1960	50,6	[1]	RbF	Пл	775	17,3	[1, 2]
Ni ₂ S	Пл	645	12,5	[4]		Исп	1408	165,3	[5]
NpCl ₃	Пл	802	—	[2]	RbH ₂ PO ₄	Сэ	—126	0,00	[7]
O ₂	Тв	—249,50	0,0937	[1]	RbOH	Пл	245	7,11	[1]
	Тв	—229,45	0,7431	[1, 12]		Исп	301	6,77	[1]
	Пл	—218,81	0,444	[1]	RbO ₂	Пл	412	—	[1]
	Исп	—183,0	6,819	[1]	Re	Свп	—270,73	0,00	[7]
O ₃	Пл	—192,5	—	[1]		Пл	3180	38	[1]
	Исп	—111,5	10,66	[1]		Исп	5600	707	[1]
Os	Свп	—272,44	0,00	[7]	ReF ₆	Пл	18,8	21	[1]
	Пл	2700	—	[1]		Исп	47,6	28,8	[1]
OsO ₄	Пл	40,1	14,27	[6]	Rh	Пл	1960	—	[1]
	Исп	130	39,5	[5]		Исп	3960	—	[1]
P (белый)	Тв	—77	—	[1]	Rn	Пл	—71,0	2,67	[1]
	Пл	44,2	2,51	[1]		Исп	—62	16,4	[1]
(красный)	Пл	590	20,29	[2]	Ru	Свп	—272,68	0,00	[7]
	Исп	281	12,4	[1]		Тв	1035	0,14	[3]
PCl ₃	Пл	—92	4,25	[1, 9]		Тв	1200	—	[3]
	Исп	74,1	30,5	[5]		Тв	1500	0,96	[3]
PF ₅	Пл	—93,8	11,8	[1]		Пл	2500	—	[3]
	Исп	—84,6	17,2	[1]		Исп	4110	—	[1]
PH ₃	Тв	—242,8	0,0824	[1]	S	Тв	95,31	0,401	[1]
	Тв	—223,7	0,778	[1]		Тв	101	0,0016	[1]
	Тв	—185,0	0,485	[1]		Пл	115,18	1,718	[1]
	Пл	—133,8	1,130	[1]		Исп	444,60	90,75	[2, 12]
	Исп	—87,77	14,598	[1]	SF ₆	Тв	—178,8	1,607	[1]
Pa	Пл	1600	—	[1]		Пл*	—50,7	5,02	[2]
	Исп	4230	—	[1]	SO ₂	Пл	—75,51	7,401	[1]
Pb	Свп	—265,93	0,00	[7]		Исп	—10,08	24,94	[1]
	Пл	327,3	4,772	[1]	SO ₃	Пл(γ)	16,8	2,0	[2]
	Исп	1751	179,5	[1]		Пл(β)	32,5	10,3	[2]
PbCl ₂	Пл	498	23,6	[4]		Пл(α)**	62,2	25,5	[2]
	Исп	951	127	[1]	Sb	Тв	94,6	—	[1]
PbO	Тв	489	—	[1]		Тв	413	—	[1]
	Пл	890	11,7	[4]		Пл	630,5	20,41	[4, 12]
	Исп	1472	213	[5]		Исп	1637	128,2	[1]
PbS	Пл	1114	17,4	[4]					

* При $P = 1700$ мм рт. ст.** При $P = 1760$ мм рт. ст.

Вещество	Переход	$t, ^\circ\text{C}$	$\Delta H,$ кДж/моль	Литература
SbCl ₃	Пл	73,3	12,68	[4]
	Исп	221	45,19	[2]
SbF ₅	Пл	8,3	—	[1]
	Исп	142,7	9,74	[1]
SbH ₃	Пл	—88,5	—	[1]
	Исп	—17,0	21,3	[1]
Sc	Пл	1400	16,1	[1]
	Исп	3900	305	[1]
Se	Тв	150	0,75	[2]
	Пл	217,4	5,42	[1]
	Исп	657	—	[10]
SeF ₆	Пл*	—34,6	6,69	[1]
Si	Пл	1423	46,5	[1]
	Исп	2355	394,5	[1]
SiCl ₄	Пл	—69,9	7,72	[1]
	Исп	56,7	28,7	[5]
Si ₂ F ₆	Пл ^{2*}	—18,7	14,6	[2]
	Исп ^{2*}	—18,7	27,7	[2]
SiH ₄	Субл	—19,1	42,3	[2]
	Тв	—209,7	0,615	[1]
	Пл	—184,67	0,667	[1]
	Исп	—111,4	12,1	[2]
SiF ₂ Cl ₂	Пл	—139,7	—	[1]
	Исп	—32,2	21,2	[5]
SiO ₂	Тв	117	0,29	[1]
	Тв	163	0,17	[1]
	Тв	225	0,19	[1]
	Тв	225÷262	1,3	[1]
	Тв	867	0,50	[1]
	Тв	1470	0,21	[1]
(кристалл)	Пл	1610	8,52	[2]
(аморфный)	Пл	1713	7,68	[2]
Sm	Пл	1350	—	[2]
	Исп	1600	—	[10]
Sn	Свп	—269,42	0,00	[7]
	Тв	18	2,5	[1]
	Тв	202,8	0,008	[1]
	Пл	231,9	7,07	[1, 12]
	Исп	2687	290,4	[1]
SnAu	Пл	418	25,60	[1]
SnCl ₄	Пл	—33,3	9,16	[1]
	Исп	113,9	34,9	[1]
SnH ₄	Пл	—150	—	[1]
	Исп	—51,8	19,05	[1]
SnO ₂	Тв	410	1,9	[1]
SnO	Исп	1456	161	[1]
Sr	Тв	589	0,84	[1]
	Пл	770	9,2	[1]
	Исп	1367	138,9	[1]
SrCl ₂	Пл	872	171	[4]
SrO	Пл	2460	69,9	[1, 9]
	Исп	3200	530	[1]
n-T ₂	Пл	—252,9	—	[1]
	Исп	—251,02	—	[1]
T ₂ O	Пл	4,49	—	[1]
Ta	Свп	—268,77	0,00	[7]
	Пл	2996	31,4	[1]
	Исп	5400	753	[1]
TaC	Свп	—263,75	0,00	[7]
	Пл	3877	—	[1]
TaCl ₅	Пл	215,9	46,4	[1, 2]
	Исп	232,9	54,8	[1]

* При $P = 1500$ мм рт. ст.** При $P = 780$ мм рт. ст.

Вещество	Переход	$t, ^\circ\text{C}$	$\Delta H,$ кДж/моль	Литература
TaF ₅	Пл	91,5	—	[9]
	Исп	229,2	56,9	[1]
Tb	Тв	—45,48	—	[1]
	Пл	1356	—	[11]
	Исп	2800	—	[11]
Tc	Свп	—261,95	0,00	[7]
	Пл	2140	—	[10]
	Исп	4700	—	[10]
Te	Пл	449,5	17,5	[1]
	Исп	989,8	114,06	[1]
TeCl ₄	Пл	224,1	18,9	[1]
	Исп	388	77,0	[1]
Th	Свп	—272,83	0,00	[7]
	Тв	225	—	[1]
	Тв	1400	2,8	[1]
	Пл	1695	15,65	[1]
	Исп	4200	544	[1]
ThCl ₄	Пл	770	40,2	[9]
	Исп	921	146,4	[2]
ThO ₂	Пл	2950	—	[2]
	Исп	4400	—	[1]
Ti	Свп	—272,78	0,00	[7]
	Тв	1080	3,40	[1]
	Пл	1668	15,5	[1]
	Исп	3280	430	[1]
TiCl ₂	Афм	—170	0,00	[7]
	Исп	1500	232	[1, 6]
TiCl ₄	Пл	—24,3	9,37	[1, 4]
	Исп	136,5	36,2	[1]
TiC	Пл	3170	—	[1]
TiN	Пл	2947	84	[1, 9]
TiO	Тв	991	343	[1]
	Пл	2020	58,5	[9]
	Исп	2700	—	[1]
TiO ₂	Тв	642	1,3	[2]
	Пл	1855	64,8	[1, 9]
	Исп	2900	—	[1]
Tl	Свп	—270,77	0,00	[7]
	Тв	234	0,40	[1]
	Пл	303,5	4,201	[1]
	Исп	1457	162,4	[5]

Продолжение табл. 11.1

Вещество	Переход	$t, ^\circ\text{C}$	$\Delta H, \text{кДж/моль}$	Литература
TlCl	Пл	427	16,5	[3]
	Исп	807	102,2	[5]
TlF	Пл	327	14,0	[1]
	Исп	655	—	[1]
Tl ₂ Hg ₅	Пл	14,5	2,03	[1]
TlNO ₃	Тв	61,0	1,0	[2]
	Тв	143,0	3,18	[2]
	Пл	207	9,58	[4]
	Исп	433	—	[1]
TlNa	Пл	306	15,1	[9]
Tu	Пл	1545	—	[11]
	Исп	1727	—	[11]
U	Свп	—272,35	0,00	[7]
	Тв	662	2,93	[1]
	Тв	772	4,78	[1]
	Пл	1133	19,7	[1]
	Исп	3900	412	[1]
UC	Пл	2427	—	[2]
UCl ₄	Пл	598	45,0	[1]
UF ₄	Пл	1036	—	[6]
	Исп	1417	—	[6]
UF ₆	Пл*	64,06	19,193	[1]
	Исп	56,5	28,7	[1]
UH ₃	Фм	—93	0,00	[7]
UO ₂	Пл	2730	—	[1]
V	Свп	—268,05	0,00	[7]
	Пл	1730	17,5	[1, 2]
	Исп	3380	458	[1]
VF ₅	Пл	19,5	49,96	[1]
	Исп	48,3	44,52	[1]
VN	Свп	—271	0,00	[7]
V ₂ O ₄	Тв	72	8,57	[1]
	Пл	1542	113,8	[1]
	Исп	2700	—	[1]
W	Пл	3380	35,2	[4, 12]
	Исп	5530	799	[1]
WC	Свп	—270	0,00	[7]
	Пл	2867	—	[1]
WCl ₆	Тв	169	—	[1]
	Тв	226,9	14,2	[1]
	Пл	284	9,6	[1]
	Исп	348	52,7	[1]

* При $P = 1133 \text{ мм рт. ст.}$

Продолжение табл. 11.1

Вещество	Переход	$t, ^\circ\text{C}$	$\Delta H, \text{кДж/моль}$	Литература
WF ₆	Тв	—8,2	6,7	[6]
	Пл	2,3	2,1	[6]
	Исп	17,06	26,13	[1]
WO ₃	Асэ	737	0,00	[7]
	Пл	1473	62,8	[1, 6]
	Исп	1800	—	[1]
Xe	Пл	—111,9	2,295	[1]
	Исп	—108,1	12,64	[1]
Y	Пл	1500	17,2	[1]
	Исп	3200	393	[1]
Yb	Пл	824	—	[11]
	Исп	1427	—	[11]
Zn	Свп	—272,36	0,00	[7]
	Пл	419,505	7,28	[1, 12]
	Исп	907	114,7	[5]
ZnCl ₂	Пл	318	23,0	[1, 2]
	Исп	721	126	[1]
ZnF ₂	Пл	872	—	[1]
	Исп	1500	190,1	[1]
ZnS	Тв	1020	13,4	[1, 6]
	Пл*	1830	—	[1]
	Исп	1665	250,2	[1]
Zr	Сфп	—272,45	0,00	[7]
	Тв	862	3,8	[1]
	Пл	1855	20	[1, 9]
	Исп	4380	582	[1]
ZrC	Свп	—270,85	0,00	[7]
	Пл	3530	—	[1]
ZrCl ₄	Пл	437	38	[1]
ZrN	Свп	—271,88	0,00	[7]
	Пл	2987	—	[1]
ZrO ₂	Тв	1205	5,94	[1]
	Пл	2687	87,0	[1, 4]
	Исп	4300	—	[1]

* При $P = 10,2 \text{ атм.}$

Температура и скрытая теплота фазовых переходов органических соединений

при давлении 760 мм рт. ст.

Обозначения: Алл — аллотропное превращение; Пл — переход твердое тело — жидкость (плавление); Исп — переход жидкость — пар (испарение).

Формула	Название	Переход	t , °C	ΔH , кДж/моль	Литература
CH ₄	Метан	Алл Пл Исп	—252,65 —182,6 —161,58	0,0655 0,938 8,289	[1, 2] [1] [13]
CH ₃ F	Фторметан	Пл Исп	—141,8 —78,5	— 17,56	[1] [1]
CH ₃ Cl	Хлорметан	Пл Исп	—97,71 —24,0	6,429 21,63	[1] [1]
CH ₃ Br	Бромметан	Алл Пл Исп	—99,4 —93,7 3,5	0,47 5,98 23,90	[1] [1] [1]
CH ₂ Cl ₂	Дихлорметан	Пл Исп	—96,5 40	4,6 28,0	[1] [1]
CHF ₃	Трифторметан (фреон-23)	Пл Исп	—163 —82,2	— 18,4	[14] [14]
CHF ₂ Cl	Дифторхлорметан (фреон-22)	Пл Исп	—160 —40,8	4,12 20,22	[1, 14] [14]
CHFCI ₂	Фтордихлорметан (фреон-21)	Пл Исп	—135 8,92	— 24,0	[1] [1]
CF ₄	Тетрафторметан (фреон-14) (углерод четырехфтористый)	Алл Пл Исп	—197,1 —183,7 128,0	1,734 0,700 12,33	[1] [1, 14] [1, 14]
CF ₃ Cl	Трифторхлорметан (фреон-13)	Пл Исп	—180 —81,5	— 14,63	[14] [14]
CF ₂ Cl ₂	Дифтордихлорметан (фреон-12)	Пл Исп	—155 —29,8	4,14 19,61	[2] [14]
CFCl ₃	Фтортрихлорметан (фреон-11)	Пл Исп	—111,0 23,77	6,893 24,9	[1, 14] [1, 14]
CF ₃ Br	Трифторбромметан (фреон-13B1)	Пл Пл Исп	—175,5 —143,2 —57,8	— — 22,7	[1] [14] [1]
CF ₂ Br ₂	Дифтордибромметан (фреон-12B2)	Пл Исп	—110,1 24,5	— —	[1] [14]
CF ₂ ClBr	Дифторхлорбромметан	Пл Исп	—159,2 —3,8	— —	[1] [14]
CCl ₄	Углерод четыреххлористый	Алл Пл Исп	—47,8 —22,9 76,69	4,56 2,5 30,0	[1] [1] [1]
CH ₄ O	Метанол (метилловый спирт)	Алл Пл Исп	—115,8 —97,9 64,6	0,645 3,17 35,39	[1] [1] [1]
CH ₂ O	Формальдегид	Пл Исп	—118 —19,3	— 24,5	[1] [1, 2]
CH ₂ O ₂	Муравьиная кислота	Пл Исп	8,2 100,5	12,68 22,26	[1] [1]
CCl ₂ O	Фосген	Пл Исп	—127,8 7,5	5,694 24,40	[1] [1]
CH ₅ N	Метиламин	Пл Исп	—33,5 —6,3	0,134 25,82	[1] [1]
CHON	Циановая кислота	Исп	23,2	29,0	[1]
CH ₂ N ₂	Цианамид	Пл	42,8	8,8	[1]
CClN	Хлорциан	Пл Исп	—6,90 12,9	11,34 26,31	[1] [2]
C ₂ H ₆	Этан	Пл Исп	—183,3 —88,63	2,857 14,70	[1] [1, 13]
C ₂ H ₄	Этен (этилен)	Пл Исп	—169,2 —103,7	3,351 13,54	[13] [1]
C ₂ H ₂	Этин (ацетилен)	Пл Исп	—81,5* —83,6	3,76 17,27	[1] [13]

* При $P = 900$ мм рт. ст.

Формула	Название	Переход	t , °C	ΔH , кДж/моль	Литература
C_2H_5F	Фторэтан	Пл	-143,2	—	[1]
		Исп	-32,0	21,07	[1]
C_2H_5Cl	Хлорэтан	Пл	-138,3	4,45	[1]
		Исп	12,2	24,65	[1]
C_2H_5F	Фторэтен	Пл	-160,5	—	[2]
		Исп	72,2	17,1	[2]
C_2H_3Cl	Хлорэтен	Пл	-159,7	4,74	[1]
		Исп	-13,7	20,8	[1]
C_2HCl	Хлорэтин	Исп	-29,6	22,5	[1]
$C_2H_4Cl_2$	1,1-Дихлорэтан	Пл	-97,0	7,870	[1]
		Исп	57,4	28,71	[1]
$C_2H_4Cl_2$	1,2-Дихлорэтан	Пл	-35,9	8,837	[1]
		Исп	82,4	31,45	[15]
$C_2H_4Br_2$	1,2-Дибромэтан	Алл	-23,6	1,94	[1]
		Пл	9,9	10,94	[1]
		Исп	131,5	36,2	[15]
$C_2H_2Cl_2$	1,1-Дихлорэтен	Пл	-122,56	6,51	[1]
		Исп	31,7	26,4	[2]
$C_2H_3F_3$	1,1,1-Трихлорэтан (фреон-143)	Пл	-111,3	6,19	[14]
		Исп	-47,6	19,8	[1, 14]
$C_2H_3Cl_3$	1,1,2-Трихлорэтан	Пл	-36,1	11,38	[1]
		Исп	113,9	36,8	[2]
$C_2H_3F_2Cl$	1,1-Дифтор-1-хлорэтан (фреон-142)	Пл	-130,8	2,69	[14]
		Исп	-9,8	22,4	[14]
C_2F_4	Тетрафторэтен	Пл	-131,1	7,714	[1]
		Исп	-75,6	16,82	[1]
C_2Cl_4	Тетрахлорэтен	Пл	-22	10,5	[1]
		Исп	121,0	34,7	[1]
C_2F_6	Гексафторэтан	Алл	-169,2	3,74	[1]
		Пл	-100,0	2,69	[1]
		Исп	-78,8	16,15	[1]
C_2F_5Cl	Пентафторхлорэтан (фреон-115)	Алл	-192,9	2,626	[1]
		Пл	-106,0	1,878	[14]
		Исп	-38,0	19,41	[14]
$C_2F_4Cl_2$	1,1,1,2-Тетрафтор-2,2-дихлорэтан (фреон-114)	Пл	-93,9	—	[14]
		Исп	3,6	28,51	[14]
$C_2F_3Cl_3$	1,2,2-Трифтор-1,1,2-трихлорэтан (фреон-113)	Пл	-36,5	—	[14]
		Исп	47,6	27,47	[14]
$C_2F_2Cl_4$	1,2-Дифтор-1,1,2,2-тетрахлорэтан	Пл	24,6	—	[14]
		Исп	92,8	—	[14]
C_2H_6O	Этаиол (этиловый спирт)	Пл	-114,7	5,02	[1]
		Исп	78,4	38,74	[15]
C_2H_4O	Диметилловый эфир	Пл	-141,5	4,94	[1]
		Исп	-24,8	21,51	[1]
C_2H_4O	Ацетальдегид	Пл	-188	3,22	[2]
		Исп	20,1	27,1	[2]
C_2H_4O	Этилена окись	Пл	-112,5	5,173	[1]
		Исп	10,5	25,53	[1]
C_2H_2O	Кетев	Пл	-151	7,53	[1]
		Исп	-41	20,25	[1]
$C_2H_6O_2$	Этиленгликоль	Пл	-12,4	11,6	[1]
		Исп	197,4	57,03	[1]
$C_2H_4O_2$	Уксусная кислота	Пл	16,6	11,73	[1]
		Исп	118,5	23,70	[1]
$C_2H_4O_2$	Метилформиат	Пл	-99	6,7	[1]
		Исп	32,0	27,89	[15]
$C_2H_4O_3$	Гликолевая кислота	Пл	63	8,4	[2]
		Исп	78	8,8	[2]
C_2H_5ClO	Хлорэтанол	Пл	-67,5	—	[1]
		Исп	128,6	41,4	[1]
C_2H_7N	Этиламин	Пл	-81,0	—	[2]
		Исп	16,6	27,30	[1]
C_2H_7N	Диметиламин	Пл	-92,2	5,939	[1]
		Исп	7,4	26,10	[1]

Формула	Название	Переход	t , °C	ΔH , кдж/моль	Литература
C_2H_3N	Этаннытрил	Пл	— 44,9	8,91	[2]
		Исп	81,5	32,75	[2]
C_2H_5ON	Ацетамид	Пл	71	14,2	[2]
		Исп	221,2	—	[1]
$C_2H_5O_3N$	Этилнитрат	Пл	— 94,6	8,527	[1]
		Исп	87,7	33,9	[1]
C_3H_8	<i>n</i> -Пропан	Пл	—187,7	2,524	[1, 13]
		Исп	— 42,06	18,77	[13]
C_3H_6	Пропен (пропилен)	Пл	—186,3	3,002	[1]
		Исп	— 47,75	18,42	[13]
C_3H_6	Циклопропан	Пл	—136,1	4,389	[1, 13]
		Исп	— 34,42	20,92	[13]
C_3H_4	Пропин (метилацетилен)	Пл	—102,7	—	[1]
		Исп	— 23,23	22,03	[13]
C_3H_7Cl	1-Хлорпропан	Пл	—122,3	5,544	[1]
		Исп	45,7	27,6	[1]
C_3H_7Br	1-Бромпропан	Пл	—108,1	6,53	[1]
		Исп	68,8	29,9	[1]
C_3H_5Br	3-Бромпропен	Пл	—119,3	—	[1]
		Исп	70,2	—	[1]
C_3H_8O	1-Пропанол (пропиловый спирт)	Пл	—126,2	5,20	[1]
		Исп	97,8	41,81	[1]
C_3H_8O	2-Пропанол (изопропиловый спирт)	Пл	— 88,5	5,37	[1]
		Исп	82,5	40,48	[15]
C_3H_8O	Метилэтиловый эфир	Исп	7,5	24,73	[15]
C_3H_6O	Ацетон	Пл	— 96,5	5,72	[1]
		Исп	56,1	29,09	[1]
$C_3H_6O_2$	Пропионовая кислота	Пл	— 20,8	7,53	[1]
		Исп	139,3	30,63	[1]
$C_3H_6C_2$	Этилформиат	Пл	— 79,2	9,2	[1]
		Исп	54,3	30,31	[15]
$C_3H_6O_2$	Метилацетат	Пл	— 98,0	—	[1]
		Исп	57,8	31,20	[15]
$C_3H_4O_2$	Акриловая кислота	Пл	12,3	11,1	[1]
		Исп	141,6	—	[1]
$C_3H_8O_3$	Глицерин	Пл	18,2	18,47	[1]
		Исп	290,5	—	[1]
C_3H_8N	Пропиламин	Исп	48,5	29,05	[1]
C_3H_5N	Этилцианид	Пл	— 91,8	6,07	[1]
		Исп	97,10	31,0	[1]
$C_3H_7O_2N$	Уретан	Пл	48,7	15,2	[1]
$C_3H_7O_3N$	Пропилнитрат	Исп	110	37,1	[1]
C_4H_{10}	<i>n</i> -Бутан	Алл	—165,60	3,667	[13]
		Пл	—138,35	4,660	[16]
		Исп	— 0,50	22,39	[13]
C_4H_{10}	2-Метилпропан (изобутан)	Пл	—159,60	5,541	[16]
		Исп	— 11,7	21,30	[13]
C_4H_8	1-Бутен (бутилен)	Пл	—185,3	3,848	[1]
		Исп	— 6,25	21,92	[13]
C_4H_8	<i>цис</i> -2-Бутен	Пл	—138,91	7,308	[16]
		Исп	3,72	23,35	[13]
C_4H_8	<i>транс</i> -2-Бутен	Пл	—105,55	9,757	[16]
		Исп	0,88	22,76	[13]
C_4H_8	2-Метилпропен (изобутилен)	Пл	—140,35	5,933	[16]
		Исп	— 7,01	22,12	[13]
C_4H_8	Циклобутан	Алл	—126,79	5,894	[13]
		Пл	— 90,7	1,008	[1]
		Исп	12,6	24,9	[13]
		Исп	— 7,5	—	[1]
C_4H_8	Метилциклопропан	Пл	—177,32	2,801	[13]
C_4H_6	1,2-Бутадиен	Пл	—136,19	6,961	[13]
		Исп	10,84	—	[13]
C_4H_6	1,3-Бутадиен (дивинил)	Пл	—108,92	7,985	[16]
		Исп	— 4,6	22,59	[13]

Формула	Название	Переход	t , °C	ΔH , кДж/моль	Литература
C_4H_6	1-Бутин (этилацетилен)	Пл Исп	—125,72 8,07	6,031 24,52	[13] [13]
C_4H_6	2-Бутин	Пл Исп	—32,2 27,0	9,235 26,54	[17] [13]
C_5H_6	Циклобутен	Исп	2,4	23,54	[13]
C_4H_4	Бутенин (винилацетилен)	Исп	5,1	24,54	[13]
C_4H_2	1,3-Бутадиен	Пл Исп	—36,4 10,3	— 23,32	[1] [13]
C_4H_8F	2-Фторбутан	Пл Исп	—121,4 25,1	— 26,05	[1] [1]
C_4H_8Br	1-Бромбутан	Пл Исп	—112,8 99,4	9,241 32,53	[1] [1]
C_4F_8	Октафторциклобутан	Пл	—40,2*	2,768	[1]
$C_4H_{10}O$	1-Бутанол (<i>n</i> -бутиловый спирт)	Пл Исп	—89,3 117,6	8,98 43,97	[1] [1]
$C_4H_{10}O$	2-Бутанол (бутиловый спирт вторичный)	Пл Исп	—114,7 99,5	— 43,56	[1] [15]
$C_4H_{10}O$	2-Метилпропанол (бутиловый спирт, третичный)	Пл Исп	25,5 82,9	6,79 39,97	[1] [15]
$C_4H_{10}O$	2-Метилпропанол (изобутиловый спирт)	Пл Исп	—108 107,2	— 43,47	[1] [1]
$C_4H_{10}O$	Диэтиловый эфир	Пл Исп	—116,2 34,6	6,90 26,60	[1] [1]
C_4H_8O	2-Бутанон	Пл Исп	—87,1 79,6	8,48 32,8	[1] [1]
C_4H_8O	Дивиниловый эфир	Пл Исп	—100 28,3	7,95 26,2	[1] [1]
C_4H_4O	Фуран	Пл Исп	—85,6 31,4	3,802 27,09	[1] [1]
$C_4H_8O_2$	Масляная кислота	Пл Исп	—5,8 164,0	11,07 42,01	[1] [1]
$C_4H_8O_2$	Изомасляная кислота	Пл Исп	—46,0 154,7	5,0 41,1	[1] [1]
$C_4H_8O_2$	Пропилформат	Пл Исп	—92,9 81,3	— 31,9	[1] [1]
$C_4H_8O_2$	Этилацетат	Пл Исп	—83,8 77,1	10,48 32,26	[1] [1]
$C_4H_8O_2$	Метилпропионат	Исп	79,8	32,64	[15]
C_4H_6O	Метилакрилат	Исп	99,5	40,29	[1]
C_4H_4S	Тиофен	Пл Исп	—38,3 84,2	5,09 31,47	[1] [1]
$C_4H_{11}N$	Бутиламин	Пл Исп	—50,5 70	— 27,2	[1] [1]
$C_4H_{11}N$	Диэтиламин	Пл Исп	—48,0 55,5	— 28,83	[1] [1]
C_5H_{12}	<i>n</i> -Пентан	Пл Исп	—129,7 36,1	8,414 25,77	[18] [1, 13]
C_5H_{12}	2-Метилбутан (изопентан)	Пл Исп	—159,9 27,8	5,156 24,59	[18] [13]
C_5H_{12}	2-2-Диметилпропан (неопентан)	Алл Пл Исп	—133,1 —16,6 9,50	2,575 3,256 22,75	[13] [19] [20]
C_5H_{10}	1-Пентен	Пл Исп	—165,2 30,0	5,807 25,2	[19, 20] [1, 13]
C_5H_{10}	<i>цис</i> -2-Пентен	Пл Исп	—151,4 37,0	7,113 26,95	[20, 21] [13]
C_5H_{10}	<i>транс</i> -2-Пентен	Пл Исп	—140,2 36,4	8,368 26,15	[20, 21] [13]
C_5H_{10}	2-Метил-1-бутен	Пл Исп	—137,5 31,2	7,912 25,50	[20, 21] [13]
C_5H_{10}	3-Метил-1-бутен	Пл Исп	—168,5 20,06	5,36 24,04	[20, 21] [13]

* При $P = 591$ мм рт. ст.

Формула	Название	Переход	t , °C	ΔH , кдж/моль	Литература
C_5H_{10}	2-Метил-2-бутен	Пл Исп	—133,8 38,7	7,598 26,30	[20, 21] [13]
C_5H_{10}	Циклопентан	Алл Алл Пл Исп	—150,76 —135,06 —93,8 49,3	4,884 0,344 0,609 27,2	[1] [1, 13] [13] [13]
C_5H_8	1,2-Пентадиен	Пл Исп	—137,3 44,9	— 27,17	[22] [13]
C_5H_8	<i>цис</i> -1,3-Пентадиен (<i>цис</i> -пипирилен)	Пл Исп	—137,3 42,0	— 27,08	[22] [13]
C_5H_8	<i>транс</i> -1,3-Пентадиен (<i>транс</i> -пипирилен)	Пл Исп	—87,5 42,0	6,345 26,84	[22] [13]
C_5H_8	1,4-Пентадиен	Пл Исп	—148,3 26,1	6,142 26,0	[22] [1, 13]
C_5H_8	2,3-Пентадиен	Пл Исп	—125,6 48,3	— 27,78	[22] [13]
C_5H_8	2-Метил-1,3-бутадиен (изопрен)	Пл Исп	—146,7 34,1	4,83 25,82	[1, 22] [13]
C_5H_8	Циклопентен	Алл Пл Исп	—186,08 —135,1 44,24	0,4795 3,363 27,33	[1, 21] [13] [13]
C_5H_8	Спиропентан	Пл Исп	—107,0 39,0	6,435 3,39	[1] [13]
C_5H_8	1-Пентин	Исп	40,25	27,78	[13]
C_5H_6	Циклопентадиен	Исп	40,5	26,79	[13]
$C_5H_{11}Br$	1-Бромпентан	Пл Исп	—89,3 128,6	14,27 30,5	[1] [1]
$C_5H_{12}O$	1-Пентанол	Пл Исп	—79,8 138,2	9,795 —	[1] [1]
$C_5H_{12}O$	2-Пентанол	Исп	119,15	—	[1]
$C_5H_{12}O$	2-Метил-2-бутанол	Алл Пл Исп	—127,2 —9,1 102,3	1,96 4,49 —	[1] [1] [1]
$C_5H_{12}O$	Этилпропиловый эфир	Исп	61,4	28,9	[1]
$C_5H_{12}O$	Метилтретбутиловый эфир	Пл Исп	—108,6 55,1	— 28,3	[1] [1]
$C_5H_{10}O$	2-Пентанон	Пл Исп	—77,7 101,9	10,6 —	[1] [1]
$C_5H_{10}O$	Циклопентанол	Алл Пл Исп	—70,4 —16,3 140,2	3,71 1,54 —	[1] [1] [1]
$C_5H_{10}O_2$	Валериановая кислота	Пл Исп	—34,5 184,7	7,74 44,0	[1] [1]
$C_5H_{10}O_2$	Изовалериановая кислота	Пл Исп	—30,0 176,7	7,32 43,1	[1] [1]
$C_5H_{10}O_2$	Бутилформиат	Пл Исп	—91,9 105,1	— 31,7	[1] [1]
$C_5H_{10}O_2$	Изобутилформиат	Пл Исп	—95,8 92,8	— 33,85	[1] [1]
$C_5H_{10}O_2$	Пропилацетат	Исп	101,8	34,71	[1]
$C_5H_{10}O_2$	Этилпропионат	Пл Исп	—73,9 91,8	12,6 34,42	[1] [15]
$C_5H_{10}O_2$	1-Метилбутират	Исп	102,3	34,42	[15]
$C_5H_{10}O_2$	2-Метилбутират	Исп	176,5	—	[1]
$C_5H_{10}S$	Тиациклогексан	Пл Исп	19,10 141,7	2,448 36,14	[1] [1]
$C_5H_{11}N$	Пиперидин	Исп	103,5	32,3	[1]
C_5H_5N	Пиридин	Пл Исп	—4,7 115,2	8,278 35,11	[1] [1]
C_6H_{14}	<i>n</i> -Гексан	Пл Исп	—95,3 68,7	13,03 28,85	[18] [23]
C_6H_{14}	2-Метилпептан	Пл Исп	—153,6 60,3	6,266 27,79	[13] [23]

Формула	Название	Переход	t , °C	ΔH , кДж/моль	Литература
C_6H_{14}	2,2-Диметилбутан (неогексан)	Алл	—123,36	0,285	[1]
		Алл	—146,34	5,409	[1]
		Пл	—99,7	0,579	[13]
C_6H_{12}	1-Гексен	Исп	49,7	26,3	[23]
		Пл	—139,8	9,347	[19]
C_6H_{12}	Циклогексан	Исп	63,5	28,03	[1]
		Алл	—87,06	6,65	[1, 18]
		Пл	6,6	2,665	[1]
C_6H_{10}	1-Гексин	Исп	80,7	30,08	[23]
		Пл	—132,09	—	[13]
		Исп	71,4	29,26	[13]
C_6H_6	Бензол	Пл	5,52	9,837	[13]
		Исп	80,10	30,76	[13]
C_6H_5F	Фторбензол	Пл	—42,2	11,30	[1]
C_6H_5Cl	Хлорбензол	Исп	84,7	31,20	[1]
		Пл	—45,3	9,556	[1]
C_6H_5Br	Бромбензол	Исп	132,2	35,66	[15]
		Пл	—30,7	10,63	[1]
$C_6H_{14}O$	1-Гексано́л (гексиловый спирт)	Исп	156,2	36,40	[15]
		Пл	—47,4	15,38	[1]
		Исп	157,0	50,63	[1]
$C_6H_{14}O$	2-Гексано́л	Исп	139,9	49,75	[1]
$C_6H_{14}O$	Диизопропиловый эфир	Пл	—86,8	11,24	[1]
$C_6H_{12}O$	Циклогексано́л	Алл	—9,7	8,2	[1]
		Пл	23,5	1,70	[1]
		Исп	160,5	42,4	[1]
C_6H_6O	Фено́л	Пл	41	11,6	[1]
		Исп	181,8	47,30	[1]
$C_6H_{12}O_2$	Капроновая кислота	Пл	—3,6	15,1	[1]
		Исп	205,3	—	[1]
C_6H_7N	Анилин	Пл	—6,4	10,54	[1]
$C_6H_5O_7N_3$	Пикриновая кислота	Исп	184,4	45,15	[15]
		Пл	122	19,5	[1]
		Исп	320	87,9	[1]
C_7H_{16}	<i>n</i> -Гептан	Пл	—90,6	14,022	[13]
C_7H_{14}	1-Гептен	Исп	98,4	31,69	[23]
		Пл	—119,03	12,40	[19]
C_7H_{14}	Циклогептан	Исп	93,6	30,92	[13]
		Алл	—138,4	4,966	[1]
		Алл	—75	0,290	[1]
		Алл	—60,8	0,450	[1]
		Пл	—8,03	1,882	[1]
$C_7H_5F_3$	Фенилтрифторметан	Исп	114,4	31,80	[13]
		Пл	—29,01	13,78	[1]
		Исп	102,03	32,64	[1]
$C_7H_{16}O$	1-Гептано́л (гептиловый спирт)	Пл	—32,8	18,17	[1]
C_7H_8O	Бензиловый спирт	Исп	175,9	—	[1]
		Пл	—15,6	8,970	[1]
C_7H_8O	<i>o</i> -Креозол	Исп	204,2	50,46	[1]
$C_7H_5O_6N_3$	2,4,6-Тринитротолуол	Исп	191,0	46,94	[1]
		Пл	80,5	22,6	[1]
		Исп	345	73,22	[1]
C_8H_{18}	<i>n</i> -Октан	Пл	—56,8	20,74	[19]
C_8H_8	Этилбензол (стирол)	Исп	125,3	34,57	[13]
		Пл	—30,6	10,95	[16]
		Исп	145,1	37,54	[13]
$C_8H_{18}O$	1-Октано́л	Пл	—15,0	—	[1]
C_9H_{20}	<i>n</i> -Нонан	Исп	195,3	53,1	[1]
		Алл	—55,96	6,28	[13]
		Пл	—53,5	15,47	[17]
C_9H_{12}	Изопропилбензол (кумол)	Исп	150,8	37,78	[23]
		Пл	—96,03	9,6	[18]
		Исп	159,22	38,40	[13]

Формула	Название	Переход	t , °C	ΔH , кдж/моль	Литература
$C_{10}H_{22}$	<i>n</i> -Декан	Пл Исп	—26,67 174,12	28,71 38,6	[17] [13]
$C_{10}H_8$	Нафталин	Пл Исп	80,28 217,96	18,98 42,8	[13] [1]
$C_{11}H_{24}$	<i>n</i> -Ундекан	Алл Пл Исп	—36,6 —25,6 195,9	6,858 22,18 —	[13] [13] [1]
$C_{12}H_{26}$	<i>n</i> -Додекан	Пл Исп	—9,6 216,3	36,84 —	[1] [1]
$C_{12}H_{10}$	Дифенил	Пл Исп	68,3 255	18,6 47,95	[1] [1]
$C_{13}H_{28}$	<i>n</i> -Тридекан	Пл Исп	—5,4 235	28,5 —	[1] [1]
$C_{14}H_{30}$	<i>n</i> -Тетрадекан	Пл Исп	—5,9 253,6	45,07 —	[1] [1]
$C_{15}H_{32}$	<i>n</i> -Пентадекан	Пл Исп	10,0 270,6	34,59 —	[1] [1]

11.2. ПЛАВЛЕНИЕ

Плавление — переход вещества из твердого (кристаллического) состояния в жидкое; обратный переход называется кристаллизацией. Зависимость температуры плавления от давления (кривая плавления) начинается в тройной точке и, предположительно, нигде не оканчивается, т. е. не имеет критической точки. В общем случае температура плавления $T_{пл}$ возрастает с ростом давления. Теплоту плавления можно оценить (с погрешностью около 10%) по следующим формулам [24]:

для углеводородов и кислородсодержащих органических соединений

$$L_{пл} = 4,95 \cdot T_{пл} \cdot 10^{0,00324m} \text{ кал/моль};$$

для неорганических соединений [25]

$$L_{пл} = nT_{пл}f(T_{пл}) \text{ кал/г},$$

где m — молекулярная масса; n — число атомов в молекуле вещества; $f(T_{пл})$ — эмпирическая функция:

$T_{пл}$, °K	300	600	1000	1300
$f(T_{пл})$, кал/(г·град)	1,9	2,5	3,0	3,2

Для более грубых оценок можно использовать эмпирическую формулу [25]

$$L_{пл} = aT_{пл} \text{ кал/моль},$$

где $a = 2,5$ для элементов; $a = 6$ для неорганических соединений и $a = 13,5$ для органических соединений.

Изменение температуры плавления $\Delta T_{пл}$, вызванное изменением давления ΔP , можно оценить по эмпири-

ческой формуле Джонсона [24]:

$$\Delta T_{пл} = \frac{T_{пл}\Delta P}{41,3L_{пл}\rho} \text{ град},$$

где $L_{пл}$ — теплота плавления, кал/г; ρ — плотность твердой фазы, г/см³; P — давление, атм. Соответствующее изменение теплоты плавления

$$\Delta L_{пл} = \frac{\Delta P}{41,3\rho} \left(1 + \frac{T_{пл}}{L_{пл}} \Delta C_p \right) \text{ кал/г},$$

где ΔC_p — скачок теплоемкости при плавлении, кал/(г·град).

Плавление сплавов и твердых растворов характеризуется температурным интервалом плавления. Температура начала плавления называется *солидус*, температура конца плавления — *ликвидус*. Различие между этими температурами определяется составом сплава (раствора). В случае эвтектических сплавов солидус и ликвидус совпадают; при плавлении эвтектических сплавов состав фаз не изменяется.

Плавление индивидуальных соединений (полимеров, керамик, стекол и т. п.) имеет сложный характер и происходит в температурной области, зависящей от многих факторов (состава, структуры, предыстории нагревания и т. д.). Температурой плавления называют при этом нижнюю границу температурного интервала плавления. Многие из веществ такого типа (например, стекла, смолы, пластмассы) являются переохлажденными жидкостями, т. е. находятся в термодинамически метастабильном состоянии. При повышении температуры они постепенно размягчаются. Температурой плавления при этом считают верхнюю температурную границу процесса размягчения. Обратный процесс (затвердевание) для переохлажденных жидкостей характеризуется аналогично температурой затвердевания. Важными характеристиками процессов размягчения и затвердевания являются соответственно теплостойкость и морозостойкость. Теплостойкость (по Мартенсу) измеряется наименьшей температурой, при которой изгибающее усилие 50 кг/см² вызывает заметную деформацию. Морозостойкость определяется аналогично.

Температура плавления элементов и соединений
при различных давлениях

<i>P</i> , атм	<i>t</i> , °C	<i>P</i> , атм	<i>t</i> , °C
Ar, аргон [10]		³ He, гелий-3 [27]	
400	—179,58	38,20	—272,15
750	—173,2	248	—267,15
1 000	—166,75	664	—263,15
2 000	—146,69	1 210	—257,15
3 000	—128,3	1 850	—253,15
4 000	—111,2	3 410	—243,15
5 000	—93,2	3 554,8	—242,97
6 000	—80,3		
8 000	—53,2		
Bi, висмут [10]		Hg, ртуть [10]	
1 000	267,5	2 000	—28,66
2 000	263,5	4 002	—18,48
4 000	256,5	8 018	1,87
8 000	238,0	10 034	12,06
10 000	228,8	12 064	22,24
Cs, цезий [10]		K, калий [10]	
1 000	51,9	1 000	78,7
2 000	70,2	2 000	92,4
3 000	85,7	4 000	115,8
4 000	98,5	8 000	152,5
		10 000	167,0
		12 000	179,6
Ga, галлий [10]		Kr, криптон [27]	
4 000	21,5	184	—152,9
8 000	12,6	702	—137,9
12 000	2,5	1 275	—122,5
		2 040	—103,2
		2 981	—80,6
H ₂ , водород [26]		N ₂ , азот [26]	
1,7	—259,15	1 000	—190,7
33,2	—258,15	2 000	—175,7
67,3	—257,15	3 000	—162,2
103,6	—256,15	4 000	—149,7
142,2	—255,15	5 000	—138,2
183,1	—254,15	6 000	—126,7
227,6	—253,15	7 000	—115,7
272,4	—252,15	8 000	—104,2
318,6	—251,15	9 000	—94,7
366,1	—250,15		
414,5	—249,15		
464,2	—248,15		
745	—243,15		
1422	—233,15		
2260	—223,15		
3249	—213,15		
He, гелий [27]		Na, натрий [10]	
37,08	—271,16	1 000	105,9
800	—261,04	2 000	114,2
1740	—253,15	4 000	128,8
3280	—243,15	8 000	155,1
5140	—233,15	10 000	166,7
7270	—223,15	12 000	177,5
		Ne, неон [27]	
		19,5	—248,28
		102,7	—247,04

<i>P</i> , атм	<i>t</i> , °C	<i>P</i> , атм	<i>t</i> , °C
380	—243,15	30 000	170
1 300	—233,15	35 000	209
2 250	—223,15		
3 420	—213,15	H ₂ O, вода [8, 10]	
4 850	—203,15		
O ₂ , кислород [26]		610	—5,0
		1 000	—88
14,5	—218,65	1 590	—15
56,8	—218,15	2 000	—20,15
100,2	—217,65	2 115*	—22,0*
144,9	—217,15	2 510	—20
190,8	—216,65	3 000	—18,40
P, фосфор [10]		3 530*	—17,0*
1 000	72,7	3 140	—20
2 000	99,3	3 800	—15
3 000	124,4	4 510	—10
4 000	151,3	5 440	—5
6 000	191,9	6 380*	0,16*
Rb, рубидий [10]		4 790	—15
1 000	57,9	5 280	—10
2 000	74,5	5 810	—5
3 000	89,1	6 380*	0,16*
S, сера [10]		7 000	5
400	126	7 640	10
1 000	140	8 000	12,8
Xe, ксенон [27]		9 000	20
240	—103,15	10 590	30
520	—93,15	12 319	40
805	—83,15	15 000	52,5
1 090	—73,15	18 000	66
1 380	—63,15	20 000	73,6
1 665	—53,15	25 000	102,8
1 960	—43,15	30 000	137,0
2 250	—33,15	35 000	166,6
2 605	—23,15	40 000	192,3
2 905	—13,15	NaCl·2H ₂ O, натрий хлористый [10]	
CO ₂ , углекислый газ [10]		3 690	17,5
3 000	—5,5	5 290	21,2
4 000	8,5	7 360	24,3
5 000	21,4	SiCl ₄ , кремний четыреххлористый [10]	
6 000	33,1	2 000	—10,0
8 000	55,2	4 000	42,6
10 000	75,4	6 000	92,5
12 000	93,5	8 000	139,4
CS ₂ , сероуглерод [8, 10]		10 000	183,8
5 000	—51	CCl ₄ , углерод четыреххлористый [10]	
10 000	0	1 000	14,2
15 000	46	2 000	45,9
20 000	89	4 000	102,7
25 000	130	6 000	149,5
		8 000	192,1

* Тройная точка.

<i>P</i> , атм	<i>t</i> , °C	<i>P</i> , атм	<i>t</i> , °C
CHCl_3 , хлороформ [8, 10]		15 000	5
		20 000	34
3 000	—12,1	25 000	58
4 000	3,4	30 000	80
5 000	10,0	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$, этанол [8, 10]	
6 000	32,4		
8 000	58,6	5 000	—76
10 000	83,7	10 000	—39
12 000	107,9	15 000	—5
15 000	137,0	20 000	25
20 000	192	25 000	54
25 000	243	30 000	82
		35 000	109
CHBr_3 , бромформ [10]		$\text{C}_3\text{H}_7\text{Br}$, 1-бромпропан [8, 10]	
1 000	31,5		
2 000	53,8	5 000	—56
4 000	94,7	10 000	0
6 000	130,8	15 000	34
8 000	163,2	20 000	71
10 000	194,0	25 000	105
CH_2Cl_2 , дихлорметан [8, 10]		30 000	138
5 000	—46	40 000	197
10 000	0	$\text{C}_3\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$, уретан [10]	
15 000	42		
20 000	82	1 000	57,3
25 000	120	2 000	64,2
30 000	157	4 000	75,8
$\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2\text{Cl}$, хлоруксусная кислота [10]		6 000	98
7 540	151,7	10 000	138,4
9 321	164,8	$\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4$, диметилосалат [10]	
$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$, уксусная кислота [10]			
1 000	37,7	1 000	75,8
2 000	54,3	2 000	95,8
4 000	83	4 000	132,6
6 000	108,2	8 000	196,8
8 000	129,6	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$, этилацетат [10]	
10 000	148,3		
$\text{C}_2\text{H}_4\text{Br}_2$, 1,2-дибромэтан [10]		12 100	25
500	27,45	23 800	75
1 000	34,0	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$, бутанол [8, 10]	
$\text{C}_2\text{H}_5\text{ON}$, ацетамид [10]			
1 000	93,1	5 000	—33
2 000	103,1	10 000	12
4 000	119,0	15 000	49
6 000	133,1	20 000	80
8 000	151,1	25 000	108
10 000	166,55	30 000	132
$\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$, бромэтан [8, 10]		35 000	155
5 000	—70	$\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_2\text{N}$, нитробензол [10]	
10 000	—29		
		1 000	27,9

<i>P</i> , атм	<i>t</i> , °C	<i>P</i> , атм	<i>t</i> , °C
2 000	48,1	$\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$, фенол [10]	
4 000	87,6		
6 000	122,3	1 000	53,4
8 000	153,8	2 000	63,3
10 000	184,5	4 000	99,8
$\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$, хлорбензол [8, 10]		6 000	131,9
		8 000	158,8
2 000	—12	10 000	184,6
4 000	16,7	12 000	209,2
5 000	25	$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$, анилин [10]	
6 000	41,9		
8 000	64,8	1 000	13,1
10 000	84,5	2 000	31,6
15 000	130	4 000	64,5
20 000	166	6 000	93,2
25 000	222	8 000	119,1
$\text{C}_6\text{H}_5\text{Br}$, бромбензол [10]		12 000	165,3
		$\text{C}_7\text{H}_8\text{O}$, <i>o</i> -креозол [10]	
1 000	—12,1		
2 000	5,3	1 000	47,4
4 000	35,9	4 000	81,8
6 000	62,0	8 000	118,1
10 000	107,6	C_{10}H_8 , нафталин [10]	
$\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_3\text{N}$, нитрофенол [10]			
		500	125,5
500	125,5	1 000	137,7
1 000	137,7	2 000	159,8
2 000	159,8	4 000	198,8
4 000	198,8	C_6H_6 , бензол [10]	
$\text{C}_{12}\text{H}_{11}\text{N}$, дифениламин [10]			
		1 000	32,5
1 000	32,5	4 000	56,5
4 000	56,5	8 000	77,7
8 000	77,7	3 000	77,7
3 000	77,7	4 000	96,6
4 000	96,6	5 000	114,6
5 000	114,6	6 000	131,2
6 000	131,2	8 000	162,2
8 000	162,2	10 000	190,5
10 000	190,5	$\text{C}_{13}\text{H}_{10}\text{O}$, бензофенон [10]	
$\text{C}_{13}\text{H}_{10}\text{O}$, бензофенон [10]			
		1 000	74,6
1 000	74,6	4 000	142
4 000	142	8 000	213,7
8 000	213,7		

Изменение объема $\Delta V = V_{\text{жидк}} - V_{\text{тв}}$ вещества
при плавлении [8]

Формула	Название	P , атм	ΔV , см ³ /моль
Элементы			
Al	Алюминий	1	1,51
Ar	Аргон	1	3,16
		1000	2,22
Bi	Висмут	1	-0,72
		1000	-0,74
		10 000	-0,87
Br	Бром	1	4,08
Cd	Кадмий	1	0,73
Cs	Цезий	1	1,8
		1000	1,43
Ga	Галлий	1	-0,37
		4 600	-0,407
		17 000	-0,516
H ₂	Водород	0,073	4,85
He	Гелий	102	1,10
Hg	Ртуть	1	0,519
I	Иод	1	5,43
K	Калий	1	1,05
		1000	0,926
		10 000	0,328
Kr	Криптон	1	4,49
Li	Литий	1	0,184
N ₂	Азот	1	1,01
		1000	0,81
Na	Натрий	1	0,641
		1000	0,584
		10 000	0,358
Ne	Неон	1	2,19
O ₂	Кислород	1	0,82
P	Фосфор	1	0,597
		1000	0,555
Pb	Свинец	1	0,705
Rb	Рубидий	1	1,58
		1000	1,24
S	Сера моноклинная	1	0,92
		400	1,28
	» ромбическая	1000	0,45
Sb	Сурьма	1	0,27
Se	Селен	1	1,41
Sn	Олово	1	0,46
Te	Теллур	1	1,57
Tl	Таллий	1	0,55
Xe	Ксенон	1	5,59
Zn	Цинк	1	0,69
Неорганические соединения			
Al ₂ O ₃	Окись алюминия	1	15,3
B ₂ O ₃	Окись бора	1	-0,81
CO ₂	Двуокись углерода	3000	4,7
		10 000	2,65
COS	Сероокись углерода	1	4,88
CS ₂	Сероуглерод	1	3,27
		10 000	2,17
H ₃ PO ₄	Фосфорная кислота	1	7,8
NaCl	Хлористый натрий	3690	1,26
		7360	0,41
Na ₂ SO ₄	Сернокислый натрий	1	1,18
PH ₃	Фосфористый водород	1	2,25

Формула	Название	P , атм	ΔV , см ³ /моль
PCl ₃	Треххлористый фосфор	1	4,22
SbI ₃	Трехиодистая сурьма	816	12,0
SF ₆	Шестифтористая сера	1	20,8
SiCl ₄	Четыреххлористый кремний	2000	8,87
		10 000	5,2
Органические соединения			
CF ₄	Четырехфтористый углерод	1	1,6
CCl ₄	Четыреххлористый углерод	1	3,97
		10 000	3,09
CHCl ₃	Хлороформ	3000	6,33
		10 000	4,18
CNBr ₃	Бромформ	1	9,87
		1000	8,97
		10 000	4,20
CH ₂ O ₂	Муравьиная кислота	1	5,29
CH ₃ NO ₂	Карбамид	1	0,6
C ₂ F ₄	Тетрафторэтилен	1	13,5
C ₂ F ₆	Гексафторэтан	1	6,8
C ₂ F ₂ Br ₄	Дифтортетрабромэтан	1	6,1
C ₂ H ₃ O ₂ Cl	Хлоруксусная кислота	1	10,11
C ₂ H ₄ O ₂	Уксусная кислота	1	9,37
		1000	6,89
		10 000	3,21
C ₂ H ₄ Br ₂	Дибромэтан	1000	7,14
C ₂ H ₅ ON	Ацетамид	1	6,486
		1000	5,033
		10 000	2,434
C ₂ H ₅ Br	Бромэтан	1	4,53
C ₂ H ₆ O	Этиловый спирт	2000	2,00
C ₃ H ₆ O ₂	Пропионовая кислота	1	9,13
C ₃ H ₇ Br	1-Бромпропан	2000	2,82
C ₄ H ₈ O	Этилацетат	12 100	2,14
C ₄ H ₈ O ₂	Масляная кислота	1	4,19
C ₄ H ₁₀ O	Бутиловый спирт	10 600	3,54
C ₄ H ₁₀ O ₂	Валериановая кислота	1	10,9
C ₆ H ₅ O ₂ N	Нитробензол	1	10,1
		1000	9,019
		10 000	4,959
C ₆ H ₅ Cl	Хлорбензол	1	8,0
C ₆ H ₅ Br	Бромбензол	1	8,86
C ₆ H ₆	Бензол	1	10,29
		1000	3,01
		10 000	3,30
C ₆ H ₇ N	Анилин	1	7,95
		1000	7,30
		10 000	4,20
C ₆ H ₁₂	Циклогексан	1	5,64
C ₆ H ₁₂ O ₂	Капроновая кислота	1	13,66
C ₇ H ₈ O	o-Креозол	1	8,95
C ₇ H ₈ O	m-Креозол	1	6,95
C ₈ H ₁₄	Метилциклогексан	13 800	3,47
C ₈ H ₁₀	n-Ксилол	1	2,08
C ₁₀ H ₈	Нафталин	1	18,74
C ₁₀ H ₂₀ O	Ментол	1	10,2
C ₁₂ H ₁₁ N	Дифениламин	1	16,21
C ₁₃ H ₁₀ O	Бензофенон	1	16,47
C ₁₃ H ₁₂	Дифенилметан	1	15,05
C ₁₄ H ₁₄	Дифенилэтан	1	20,59
C ₁₅ H ₁₆	Трифенилметан	1	18,15

Температуры плавления (солидус t_c и ликвидус t_l)
сталей и технических сплавов [28, 29, 30]

Марка	$t_c, ^\circ\text{C}$	$t_l, ^\circ\text{C}$
Стали жаростойкие		
X13 ÷ X28, X25T	—	1500
X18H9, X23H18	—	1410
X23H13	—	1440
0X18H10	—	1410
X18H9T	—	1425
X18H10T	—	1400
X20H14C2, X25H20C2	—	1400
4X10C2M	—	1480
Латуни		
Л 62	898	905
Л 70	915	955
Л 80	965	1000
Л 90	1020	1045
Л 96	1050	1070
ЛО 59-1 ÷ ЛО 62-1	885	906
ЛО 70-1	900	935
ЛО 90-1	995	1015
ЛО 64-2 ÷ ЛО 74-3	885	910
ЛК 80-3; ЛС 59-1	—	900
ЛС 74-3	—	965
ЛА 77-2	935	975
ЛА 85-0,5	—	1020
ЛАН 59-3-2	892	956
ЛАЖ 60-1-1	—	904
ЛМц 58-2	865	880
ЛЖМц 59-1-1	885	900
ЛН 65-5	—	960
Бронза		
Бр А5	—	1075
Бр А7	—	1050
Бр А10	—	1040
Бр АЖ9-4	—	1040
Бр АЖН10-4-4	—	1084
Бр АЖМц10-3-1,5	—	1045
Бр С30	—	970
Бр Мц5	—	1047
Бр Б2 (бериллиевая)	—	1000
Бр СФ6,5-6,4	—	995
Бр ОФ4 0,25	—	1060
Бр ОЦ10-1	—	935
Бр ОЦ10,2	—	1015
Бр ОЦС6-6-3	—	967
Бр ОЦС5-5-5	—	1000
Бр ОЦС4-4-2,5	—	1020
Бр ОЦСН 3-7-5-1	—	1022
Бр О10	—	1020
Алюминиевые сплавы		
АЛ1	535	629
АЛ10В	488	604
Д1	513	641
Д16	502	638
АВ (авиаль)	543	652
Д18П	510	648
АК-2, АК-8	509	638
В-95	477	638
АМц	643	654
АМг	627	652
АМг3, АМг5, АМг5П	568	638

Марка	$t_c, ^\circ\text{C}$	$t_l, ^\circ\text{C}$
АМг7	550	620
АСМ	657	750
АН-2,5	640	650
Магниеые сплавы		
МЛ 1, МЛ 7	505	610
МЛ 2	645	650
МЛ 3	561	628
МЛ 4	455	610
МЛ 5	492	607
МЛ 6	440	600
МЛ 11	593	843
МЛ 12	560	685
МА 1	645	646
МА 2	565	632
МА 3	510	615
МА 5	482	602
МА 8	645	650
ВМ 65-1	516	634
Медноникелевые сплавы		
М0	—	1083
М1, М3, М4	—	1080
МН 19	1130	1190
МНА 13-3	—	1183
МНЖ 5-1	1080	1120
МНЦ 15-20	—	1080
МНЦС 17-18-1,8	965	1120
МНЖМц 30-0,8-1	1170	1230
Никелевые сплавы		
Никелевая бронза (НМ-8)	—	1190
» » (НМ 56,6)	—	1290
ТБ (НМ 89)	1120	1170
ТП (НМ 99,4)	—	1084
НМц 2,5	—	1440
НМц 5	—	1410
НММц 3-12	960	1010
Манганин (НММц 85-12)	—	1010
Константан (НММц 58,5-1,5)	—	1270
Алюмель (НМцАК 2-2-1)	—	1450
Хромель (Нх 9,5)	—	1435
Ферронихром (НХМц16-15-1,5)	—	1400
Монель (НМЖМц 28-2,5-1,5)	—	1370
Монель К	—	1349
Припой и баббиты		
ПОС 90	183	222
ПОС 40	183	235
ПОС 18	183	277
ПОС 4-6	245	265
Б 90	241	342
Б 16, БС	240	410
Б 6	232	416
Б 83	240	370
Б Н	240	400
Б К	320	440
Сплавы серебра, золота, платины		
Ср М 500	850	—
Ср М 960	927	—
Зл М 980	1060	—
ПСр 25	755	—
Зл Ср 600	963	—
Зл Пл 10	1200	—

Температура плавления (солидус) двухкомпонентных сплавов при давлении 1 атм [8]

Компоненты сплава		Температура плавления, °С, при содержании компонента В, %								
А	В	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Pb	Sn	295	276	262	240	220	190	185	200	216
Pb	Tl	710	790	880	917	760	600	480	410	425
Pb	Ag	460	545	590	620	650	705	775	840	905
Pb	Na	360	420	400	370	330	290	250	200	130
Pb	Cu	870	920	925	945	950	955	985	1005	1020
Pb	Sb	250	275	330	395	440	490	525	560	600
Al	Sb	750	840	925	945	950	970	1000	1040	1010
Al	Cu	630	600	560	540	580	610	755	930	1055
Al	Au	675	740	800	855	915	970	1025	1055	675
Al	Ag	625	615	600	590	580	575	570	650	750
Al	Zn	640	620	600	580	560	530	510	475	425
Al	Fe	860	1015	1110	1145	1145	1220	1315	1425	1500
Al	Sn	645	635	625	620	605	590	570	560	540
Sb	Bi	610	590	575	555	540	520	470	405	330
Sb	Ag	595	570	545	520	500	505	545	680	850
Sb	Sn	600	570	525	480	430	395	350	310	255
Sb	Zn	555	510	540	570	565	540	525	510	470
Ni	Sn	1380	1290	1200	1235	1290	1305	1230	1060	800
Na	Bi	425	520	590	645	690	720	730	715	570
Na	Cd	125	185	245	285	325	330	340	360	390
Cd	Ag	420	520	610	700	760	805	850	895	940
Cd	Tl	300	285	270	262	258	245	230	210	235
Cd	Zn	280	270	295	313	327	340	355	370	390
Au	Cu	910	890	895	905	925	975	1000	1025	1060
Au	Ag	1062	1061	1058	1054	1049	1039	1025	1006	982
Au	Pt	1125	1190	1250	1320	1380	1455	1530	1610	1685
K	Tl	133	165	188	205	215	220	240	280	305
Cu	Ni	1180	1240	1290	1320	1335	1380	1410	1430	1440
Cu	Ag	1035	990	945	910	870	830	788	814	875
Cu	Sn	1055	890	755	725	680	630	580	530	440
Cu	Zn	1040	955	930	900	880	820	780	700	580
Ag	Zn	850	755	705	690	660	630	610	570	505
Ag	Sn	870	750	630	550	495	450	420	375	300

Таблица 11.7

Продолжение табл. 11.7

Температура плавления легкоплавких сплавов

Эвт — эвтектические сплавы или близкие к ним; для неэвтектических сплавов приводятся значения солидуса.

Сплав	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	Литература	Сплав	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	Литература
(97,2% Hg; 2,8% Na), эвт	—48,2	[31]	(80% Na; 20% K)	58	[8]
(94,5% Cs; 5,5% Na), эвт	—30	[31]	(60% Na; 40% Hg)	60	[8]
(93% Cs; 7% Na), эвт	—28	[31]	(53,5% Bi; 19% Sn; 17% Pb; 10,5% Hg)	60	[8]
(78% K; 22% Na), эвт	—11,4	[31]	(92,9% Na; 7,1% Tl), эвт	64	[31]
(80% K; 20% Na), эвт	—10	[8]	Сплавы Вуда:		
(91,8% Rb; 8,2% Na), эвт	—4,5	[31]	(50,1% Bi; 24,9% Pb; 14,6% Sn; 10,8% Cd)	65,5	[8]
(70% K; 30% Na)	—3,5	[8]	(50,4% Bi; 25,1% Pb; 14,3% Sn; 10,2% Cd)	67,5	[8]
(60% K; 40% Na)	5	[8]	(50% Bi; 25% Pb; 12,5% Sn; 12,5% Cd)	68	[8]
(50% K; 50% Na)	11	[8]	(70% Na; 30% Hg)	70	[8]
(90% K; 10% Na)	17,5	[8]	(49,5% Bi; 10,1% Cd; 27,27% Pb; 13,13% Sn), эвт	70	[8]
(56% Na; 44% K), эвт	19	[31]	(33,7% Bi; 65,3% In), эвт	72	[32]
(85,2% Na; 14,8% Hg), эвт	21,4	[31]	(50% Bi; 34,4% Pb; 9,4% Sn; 6,2% Cd)	76,5	[8]
(60% Na; 40% K)	26	[8]	(90% Na; 10% K)	77	[8]
(70% Na; 30% K)	41	[8]	(58% Bi; 17% In; 25% Sn), эвт	79	[32]
(50% Na; 50% Hg)	45	[8]	(80% Na; 20% Hg)	80	[8]
(44,7% Bi; 19,1% In; 8,3% Sn; 5,3% Cd; 22,6% Pb), эвт	47	[32]			
(70% Hg; 30% Na)	55	[8]			
(49,4% Bi; 21% In; 11,6% Sn; 18% Pb), эвт	57	[32]			

Сплав	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	Литература
(96,7% Na; 3,3% Au), эвт	80	[31]
(90% Na; 10% Hg)	90	[8]
(50% Na; 50% Hg)	90	[8]
(55,2% Bi; 33,3% Pb; 11,5% Tl), эвт	91	[32]
(49,1% Bi; 9,2% Tl; 23,4% Sn, 18,2% Cd), эвт	94,6	[32]
(52,5% Bi; 15,5% Sn; 32% Pb), эвт	96	[32]
Сплав Роуза (50% Bi; 28% Pb; 22% Sn)	100	[32]
(54,4% Bi; 25,8% Pb; 19,8% Sn), эвт	101	[8]
(67% Bi; 33% Li), эвт	109	[32]
(40% Bi; 40% Pb; 20% Sn)	113	[8]
(50% Bi; 35,7% Sn; 14,3% Tl), эвт	124	[32]
(56,5% Bi; 43,5% Sb), эвт	125	[32]
(43% Bi; 43% Pb; 14% Sn)	128	[8]
(56% Bi; 40% Sn; 4% Zn), эвт	130	[32]
(90% K; 10% Tl)	133	[32]
(70% Hg; 30% K)	135	[8]
(57% Bi; 43% Sn), эвт	138	[8]
(57% Bi; 43% Tl), эвт	139	[32]
(60% Bi; 40% Cd), эвт	144	[8]
(50% Bi; 50% Pb)	145	[8]
(66,2% Bi; 23,1% Sn; 10,7% Pb)	148	[8]
(44,8% Pb; 41,5% Sn; 13,7% Bi), эвт	160	[8]
(80% K; 20% Tl)	165	[8]
(68% Sn; 32% Cd), эвт	177	[8]
(70% Na; 30% Hg)	181	[8]
(62% Sn; 38% Pb), эвт	183	[8]
(44,2% Bi; 9,8% Pb; 48% Tl), эвт	186	[32]
(47,5% Bi; 52,5% Tl), эвт	188	[32]
(76,5% Bi; 23,5% Tl), эвт	198	[32]
(97% Bi; 3% Pb), эвт	218	[32]
(62,7% Tl; 37,3% Na), эвт	238	[32]
(82% Bi; 18% Au)	240	[32]
(99% Bi; 1% Mg)	243	[32]
(97,3% Bi; 2,7% Zn)	254	[32]
(97,5% Bi; 2,5% Ag)	262	[32]

Таблица 11.8

Температура плавления высокотемпературных керамик [1.33]

Вещество	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	Вещество	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$
HfC	3890 ± 150	NbB ₄	2900
TaC	3880 ± 150	VC	2810
ZrC	3530	HfO ₂	2790
NbC	3480	W ₂ B	2770 ± 80
HfB ₂	3250 ± 100	W ₂ C	2730 ± 15
TiN	3205	UO ₂	2730
TiC	3147	WC	2720
TaB ₂	3100	MoC	2700
TaN	3087 ± 50	ZrO ₂	2700
NbB ₂	3000	ZrB ₁₂	2680
HfN	2982	YN	2670
ZrN	2982	ThC ₂	2656 ± 75
TiB ₂	2980	ScN	2650
ThO ₂	2950	UN	2650 ± 100

Вещество	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	Вещество	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$
ThN	2630 ± 50	ScB ₂	2250
CoO	2603	Mo ₃ B ₂	2250
NdB ₆	2540	VB	2250
SmB ₆	2540	Zr ₅ Si ₃	2250
LaB ₆	2530	UC ₂	2250
Ta ₄ Si	2510	SrB ₆	2235
MgO	2500	UB ₁₂	2235
Ta ₅ Si ₃	2500	CaB ₆	2230
UB ₄	2495	BaB ₆	2230
SrO	2460	Ba ₃ N ₂	2220
CeS	2450	ThB ₄	2210
BeO	2440	Be ₃ N ₆	2205
Cr ₂ O ₂	2440	BaS	2205
Nb ₅ Si ₃	2440	Be ₃ N ₂	2200
TaB	2430	Ti ₃ B	2200
ThS	2425	CrB ₂	2200 ± 50
TaS	2425	TaSi ₂	2200
Nb ₂ N	2420	Nd ₂ S ₃	2200
Y ₂ O ₃	2410	GeB ₆	2190
AlN	2400	WSi ₂	2165
U ₂ C	2400	ThB ₆	2150
VB ₂	2400 ± 50	ZrSi	2150
WB (α)	2400 ± 100	Mo ₂ B	2140
UB ₂	2385	NdS	2140
VN	2360	Ti ₅ Si ₃	2120
MoB	2350	Gd ₂ B ₆	2100
UC	2315	Th ₃ N ₄	2100
La ₂ O ₃	2310	MoB ₂	2100
YC ₂	2300 ± 50	La ₂ S ₃	2100
W ₂ B ₅	2300 ± 50	V ₃ B ₂	2070
BeB ₆	2300	Al ₂ O ₃	2050
YB ₆	2300	CrB	2050
CaC ₂	2300	Ce ₃ S ₄	2050 ± 75
Th ₂ S	2300	MoSi ₂	2030
Th ₄ S ₇	2300	TiO	2020
NbB	2280	Al ₂ O ₃ ·BaO	2000

Таблица 11.9

Температурная стойкость различных веществ [10.34]

Обозначения: $t_{от}$ — температура отвердевания; t_n — нагревостойкость; t_p — температура размягчения; $t_{пл}$ — температура плавления.

Вещество	Температура, $^\circ\text{C}$
Смолы	
Анилинформальдегидные	$t_n = 85$
Карбамидные	$t_n = 75$
Кремнийорганические	$t_n = 200$
Полиакрилаты	$t_n = 65$
Полиамидные	$t_n = 100$
Полистирольные	$t_n = 80$
Политетрафторэтиленовые	$t_n = 190$
Полхлорвиниловые	$t_n = 60$
Полнэтиленовые	$t_n = 100$
Полиэфирные	$t_n = 115$
Фенолформальдегидные	$t_n = 115$
Эпоксидные	$t_n = 135$

Вещество	Температура, °C
Полимеры и целлюлозные материалы	
Винипласт	$t_n = 65$
Капрон	$t_n = 60$ $t_{пл} = 215$
Лавсан	$t_n = 175$ $t_p = 230$ $t_{пл} = 265$
Нейлон	$t_{от} = 49$ $t_n = 60$ $t_{пл} = 225$
Органическое стекло	$t_n = 55$ $t_{пл} = 120$
Пенопласт	$t_n = 130$
Поливинилхлорид	$t_{от} = -18$ $t_{пл} = 100$
Полипропилен	$t_{пл} = 170$
Полиэтилен (высокого давления)	$t_n = 110$ $t_{пл} = 115$
Полиэтилен (низкого давления)	$t_{пл} = 135$
Совенит	$t_n = 110$
Терилен	$t_{от} = 67$ $t_{пл} = 264$
Триацетатцеллюлоза	$t_n = 110$
Фторопласт-3	$t_n = 90$
Фторопласт-4 (тефлон)	$t_{от} = -113$ $t_n = 250$ $t_p = 400$
Целлофан	$t_n = 60$
Целлулоид	$t_n = 40$
Энант	$t_{от} = 190$ $t_{пл} = 225$
Прессованные и строительные материалы	
Амниопласты	$t_n = 110$
Амниопласты теплостойкие ВЭИ	$t_n = 170$
Волокнит	$t_n = 115$
Гетинакс	$t_n = 150$
Глины обыкновенные	$t_p > 1100$
» огнеупорные	$t_p > 1580$
Дельта-древесина	$t_n = 140$
Стекловолокнит	$t_n = 170$
Стеклотекстолит СТК	$t_n = 170$
Текстолит	$t_n = 130$
Туф лавовый	$t_{пл} = 1200$
Фенопласты	$t_n = 120$
Фибра	$t_n = 100$
Шамот	$t_{пл} > 1500$
Стекла, слюда	
Стекло оконное	$t_n = 400$
№ 23	$t_p = 550$
№ 846	$t_p = 600$
нейтральное	$t_p = 600$
белое	$t_p = 560$
№ 59'''	$t_p = 600$
кварцевое	$t_n = 1500$ $t_p = 1750$
титановое	$t_n = 1000$
Пирекс	$t_p = 660$
Слюда природная	$t_n = 600$
» синтетическая (фторофлогопит)	$t_n = 800$

Вещество	Температура, °C
Масла, природные смолы, лаки	
Вазелин	$t_{пл} = 52$
Воск	$t_{от} = 60$ $t_{пл} = 64$
Канифоль	$t_{пл} = 68$
Мазут	$t_p = 40$
Масло:	
авиационное	$t_{от} < -14$
вазелиновое	$t_{от} < -20$
веретенное	$t_{от} < -15$
конопляное	$t_{от} < -20$
машинное	$t_{от} < -10$
соларное	$t_{от} < -20$
трансформаторное	$t_{от} < -45$
Нефть	$t_{пл} = -20 \div -10$
Олеин	$t_{пл} < -6$
Парафин	$t_{пл} = 45$
Стеарин	$t_p = 33$
Шеллак	$t_{пл} = 110$
Янтарь	$t_{пл} = 360$
Различные материалы	
Бакелит	$t_p = 100$
Битум	$t_p = 70$
Каолин	$t_{пл} = 1700$
Эбонит	$t_n = 70$

11.3 КИПЕНИЕ

Процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное называется испарением. Испарение, при котором давление паровой фазы равно внешнему давлению, называется кипением; давление при этом называется *давлением насыщенного пара*. Зависимость температуры кипения $T_{кип}$ от внешнего давления называется *ортобуллической кривой*, а обратная зависимость давления насыщенных паров от температуры — *кривой упругости пара*. Кипение возможно в интервале от температуры тройной точки до критической температуры $T_{кр}$; с увеличением давления $T_{кип}$ увеличивается. Для многих веществ выполняется эмпирическое правило Гульберга—Гюн

$$T_{кип}^{(1)} \approx 0,64 T_{кр},$$

где $T_{кип}^{(1)}$ — температура кипения при $P = 1 \text{ атм}$.

Теплота испарения при кипении называется *теплотой испарения* в точке кипения $L_{кип}$. С увеличением давления и температуры кипения $L_{кип}$ уменьшается до $L_{кип} = 0$ при $T = T_{кр}$. Для оценки $L_{кип}$ можно использовать формулу

$$L_{кип} = R \frac{d \ln P}{d(1/T)}, \quad T \ll T_{кр},$$

где R — газовая постоянная. Эта формула является частным случаем уравнения Клапейрона—Клаузиуса.

Для неполярных веществ найдена эмпирическая зависимость [24]

$$L_{кип} = 1,987 T_{кип}^{(1)} \ln 82,06 T_{кип}^{(1)} \text{ кал/моль},$$

которая выполняется с погрешностью 2—3%.

Теплота испарения при разных температурах кипения

$t, ^\circ\text{C}$	$L_{\text{кип}}'$ ккал/моль	$t, ^\circ\text{C}$	$L_{\text{кип}}'$ ккал/моль
Элементы			
Ar, аргон [27]			
—183	1,524	—270,95	0,01105
—173	1,437	—270,55	0,01071
—163	1,337	—270,15	0,00788
—153	1,212	—269,95	0,00591
—143	1,050	—268,95	0,00495
—138	0,940	—268,65	0,00437
—133	0,795	—268,40	0,00363
—128	0,635	—268,15	0,00190
Cl₂, хлор [35]			
—90	5,332	118,5	14,552
—56,67	5,017	161,5	14,396
—34,04	4,809	207,6	14,336
—12,22	4,599	241,0	14,292
10,0	4,366	328,0	14,176
43,33	3,958	451,0	13,998
65,56	3,623	627,1	13,660
87,78	3,202	677,0	13,534
110,00	2,632	K, калий [35]	
132,22	1,711	327	20,057
137,78	1,321	527	19,273
143,33	0,546	727	18,357
H₂, водород [26]			
—251	0,211	927	17,417
—249	0,201	1027	16,945
—247	0,189	1127	16,469
—245	0,172	1227	15,982
—243	0,147	1327	15,475
—241	0,101	1427	14,944
—240,4	0,065	1527	14,387
—240	0,040	Kr, криптон [26, 27]	
—240,05	0,030	—153	2,158
Ne, гелий [27]			
—271,65	0,02152	—133	1,996
—271,45	0,02108	—113	1,767
—271,15	0,02232	—93	1,475
—270,95	0,02180	—88	1,379
—270,75	0,02108	—83	1,266
—270,55	0,02232	—73	0,838
—270,35	0,02248	Li, литий [35]	
—270,15	0,02256	527	36,883
—269,95	0,02252	727	36,008
—269,75	0,02236	927	34,860
—269,55	0,0220	1127	33,649
—269,35	0,02152	1327	32,473
—269,15	0,0208	1527	31,409
³He, гелий-3 [27]			
—272,69	0,00736	1727	30,485
—272,45	0,00841	N₂, азот [34]	
—272,15	0,00910	—208	1,421
—271,75	0,01032	—193	1,314
—271,35	0,01102	—183	1,213
		—173	1,102
		—168	1,028
		—163	0,933
		—158	0,806
		—153	0,622

$t, ^\circ\text{C}$	$L_{\text{кип}}'$ ккал/моль	$t, ^\circ\text{C}$	$L_{\text{кип}}'$ ккал/моль
Na, натрий [35]		CO₂, двуокись углерода [36]	
400	23,603	—50	3,544
800	21,079	—30	3,184
1100	19,563	—20	2,982
1300	18,657	—10	2,750
1400	18,199	0	2,469
1500	17,735	10	2,027
Ne, неон [27]		20	1,632
—248	0,4325	25	1,255
—243	0,3915	27,5	0,992
—241	0,3585	30	0,662
—238	0,3415	H₂O, вода [35]	
—235,65	0,3060	0	10,751
—233	0,2555	40	10,345
—230,65	0,1815	100	9,702
O₂, кислород [26]		180	8,663
—203	1,760	260	7,142
—183	1,6032	340	4,415
—163	1,440	370	1,885
—153	1,280	372	1,445
—143	1,152	374	0,602
—133	0,960	NH₃, аммиак [36]	
—123	0,640	—50	5,756
S, сера [34]		—30	5,525
200	2,408	0	5,129
300	2,208	30	4,653
400	2,158	60	4,055
500	2,296	80	3,536
600	2,595	100	2,873
620	2,666	120	1,921
640	2,741	130	0,952
646	2,764	SnCl₄, четыреххлористое олово [34]	
Неорганические соединения		100	8,226
B₂H₆, диборан [35]		140	7,537
—143	3,941	180	6,812
—123	3,737	200	6,371
—95	3,428	220	5,905
—53	2,899	240	5,413
—13	2,088	260	4,792
7	1,336	280	4,040
9	1,216	Органические соединения	
11	1,074	CH₄, метан [35]	
13	0,897	—180	2,070
15	0,651	—160	1,950
CO окись углерода [36]		—150	1,880
—188	1,396	—140	1,820
—183	1,328	—130	1,740
—178	1,260	—120	1,630
—173	1,192	—110	1,500
—168	1,125	—100	1,300
—163	1,058	—90	0,970
—158	0,985	CH₃O, метиловый спирт [37]	
—153	0,884	0	9,248
—148	0,718	50	8,768
—143	0,465		

$t, ^\circ\text{C}$	$L_{\text{кип}}$ ккал/моль	$t, ^\circ\text{C}$	$L_{\text{кип}}$ ккал/моль	$t, ^\circ\text{C}$	$L_{\text{кип}}$ ккал/моль	$t, ^\circ\text{C}$	$L_{\text{кип}}$ ккал/моль
100	7,872	CF_2Cl_2 , дифтордихлорметан (фреон-12) [38]		$\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$, трифтортрихлор- этан (фреон-113) [38]		$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$, пропиловый спирт [37]	
130	7,184	—70	5,050	—30	7,421	70	12,39
160	6,336	—40	4,897	—10	7,180	120	10,78
200	4,864	0	4,439	0	7,049	150	9,52
210	4,320	40	3,784	10	6,918	180	8,12
220	3,616	80	2,800	30	6,659	200	7,14
230	2,688	100	1,938	50	6,380	220	5,95
CH_3Cl , хлористый метил (фреон-40) [38]		105	1,506	70	6,101	240	4,41
—60	5,500	110	0,905	80	5,952	250	3,5
—40	5,300	C_2H_6 , этан [13]		$\text{C}_2\text{F}_4\text{Cl}_2$ тетрафтордихлор- этан (фреон-114) [38]		260	2,31
—20	5,060	—100	3,568	—40	5,950	C_4H_{10} , бутан [13]	
0	4,840	—80	3,395	—20	5,797	—130	6,570
20	4,568	—40	2,918	0	5,610	—90	6,250
40	4,268	—20	2,599	20	5,321	—50	5,880
50	4,107	0	2,181	30	5,185	0	5,320
60	3,938	20	1,530	40	5,015	50	4,650
CHFCl_2 , фтордихлорметан (фреон-21) [38]		30	0,869	50	4,828	90	3,820
—40	6,508	31	0,880	60	4,641	130	2,500
—20	6,253	32	0,425	C_3H_8 , пропан [13]		140	1,960
0	6,008	C_2H_4 , этен (этилен) [35]		—180	5,690	150	0,980
10	5,885	—120	3,356	—140	5,400	C_4H_8 , бутен-1 [13]	
20	5,758	—80	2,940	—100	5,080	—180	6,810
30	5,625	—40	2,385	—60	4,690	—150	6,630
35	5,559	0	1,282	—20	4,220	—100	6,260
40	5,488	5	0,954	20	3,640	—50	5,780
CHF_2Cl , дифторхлорметан (фреон-22) [38]		7	0,754	60	2,720	0	5,190
—100	5,487	8	0,616	80	1,970	50	4,440
—80	5,259	9	0,320	90	1,370	100	3,290
—50	4,919	9,5	0,274	C_3H_6 , пропилен [13]		130	2,160
—20	4,541	C_2H_2 , ацетилен [13]		—180	5,600	140	1,500
0	4,248	—30	4,070	—120	5,120	C_4H_8 , 2-метилпропен (изобутилен) [13]	
20	3,870	—60	3,730	—100	4,550	—100	6,210
40	3,388	—40	3,350	—60	4,380	—50	5,790
50	3,105	—20	2,910	0	3,800	0	5,240
CFCl_3 , фтортрихлорметан (фреон-11) [38]		—10	2,680	20	3,470	50	4,470
—40	6,610	0	2,440	50	2,780	100	3,310
—20	6,399	10	2,170	70	2,120	120	2,600
0	6,188	20	1,800	80	1,660	130	2,100
20	5,957	30	1,190	90	0,700	140	1,350
30	5,848	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$, этиловый спирт [35]		C_3H_4 , аллен [13]		C_4H_6 , бутин-1 (этилацетилен) [13]	
40	5,712	0	11,518	—130	5,610	—120	7,100
46	5,644	50	10,994	—100	5,440	—100	6,950
50	5,576	100	10,184	—60	5,150	0	5,570
CF_3Cl , трифторхлорметан (фреон-13) [38]		140	9,163	—20	4,370	100	4,510
—140	4,310	170	8,110	20	4,150	150	3,270
—90	3,834	200	6,573	60	3,380	170	2,500
—50	3,289	220	5,147	100	2,220	180	1,890
—20	2,721	230	4,255	110	1,650	190	0,470
0	2,234	240	3,082	120	0,450	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$, диэтиловый эфир [37]	
15	1,708	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$, уксусная кислота [37]		C_3H_4 , метилацетилен [13]		30	5,408
20	1,439	20	5,046	—100	6,090	60	5,024
25	1,205	50	5,304	—60	5,700	90	4,524
		80	5,496	—30	5,350	120	4,00
		120	5,592	0	4,960	150	3,296
		160	5,394	30	4,490	160	2,944
		200	5,112	60	3,890	170	2,538
		240	4,692	100	2,710	180	2,048
		260	4,350	110	2,250	190	1,248
		280	3,810	120	1,630		

$t, ^\circ\text{C}$	$L_{\text{кип}}^*$ ккал/моль	$t, ^\circ\text{C}$	$L_{\text{кип}}^*$ ккал/моль
$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$, этилацетат [37]		C_5H_8 , циклопентен [13]	
80	7,568	—120	8,080
110	7,04	—60	7,580
140	6,38	0	7,020
160	5,85	50	6,470
180	5,28	100	5,740
200	4,58	150	4,750
220	3,74	200	3,170
230	3,17	210	2,670
240	2,38	220	1,970
C_5H_{12} , пентан [13]		C_5H_8 , 2-метилбутадиен-1,3 (изопрен) [13]	
—120	7,730	—140	7,820
—80	7,410	—100	7,560
—60	7,240	0	6,580
—40	7,060	100	5,070
—20	6,850	150	3,810
0	6,630	170	3,070
20	6,380	180	2,560
30	6,250	190	1,840
40	6,120		
C_6H_{12} , изопентан [13]		C_6H_{14} , гексан [13]	
—150	7,560	—90	9,460
—130	7,450	—30	8,110
—110	7,310	20	7,580
—90	7,160	80	6,770
—50	6,790	140	5,510
—30	6,580	190	4,060
10	6,130	210	3,200
30	5,870	220	2,600
40	5,720	230	1,700
C_5H_{10} , пентен-1 [13]		C_6H_{14} , метилпентан [13]	
—160	7,710	—150	8,630
—80	7,170	—90	8,230
0	6,390	—30	7,720
50	5,770	30	7,420
100	4,990	90	6,170
150	3,890	150	4,920
180	2,640	200	3,160
190	2,000	210	2,560
200	0,800	220	1,630
C_5H_{10} , циклопентан [13]		C_6H_{12} , гексен-1 [13]	
—90	7,870	—100	8,550
—50	7,550	—50	8,100
0	7,100	0	7,590
50	6,550	50	6,970
100	5,870	100	6,190
150	4,960	150	5,130
210	3,140	200	3,420
220	2,640	210	2,990
230	1,930	220	2,130
C_5H_{10} , цис-пентен-2 [13]		C_6H_{12} , циклогексан [13]	
—150	8,240	10	8,020
—100	7,860	50	7,590
—50	7,400	100	6,970
0	6,880	150	6,110
50	6,200	200	4,960
100	5,320	250	3,440
150	4,030	260	3,000
180	2,740	270	2,300
190	2,000	280	0,850

$t, ^\circ\text{C}$	$L_{\text{кип}}^*$ ккал/моль	$t, ^\circ\text{C}$	$L_{\text{кип}}^*$ ккал/моль
C_6H_{10} , циклогексен [13]		C_7H_8 , толуол [13]	
—100	9,120	—90	9,950
0	8,240	0	9,310
50	7,720	100	8,160
100	7,110	150	7,450
150	6,310	200	6,560
200	5,210	250	5,330
250	3,440	300	3,240
260	2,880	310	2,470
270	2,070	320	0,670
C_6H_6 , бензол [35]		C_8H_{18} , октан [13]	
10	8,250	—30	10,480
50	7,750	30	9,850
100	7,070	90	8,920
150	6,300	150	7,770
200	5,350	180	7,120
250	3,880	210	6,340
260	3,430	240	5,710
270	2,900	260	4,490
280	2,150	290	2,200
C_7H_8 , гептан [13]		C_8H_{16} , октен-1 [13]	
—90	9,760	—100	10,720
—60	9,560	0	9,770
0	8,990	50	9,190
60	8,200	100	8,150
90	7,740	150	7,700
180	5,950	200	6,560
240	3,810	250	4,880
250	3,080	280	3,180
260	2,160	290	2,140
C_7H_{14} , гептен [13]		C_8H_{16} , этилциклогексан [13]	
—180	9,480	—100	10,730
—50	9,200	—50	10,370
0	8,710	0	9,930
50	8,110	100	8,760
100	7,390	200	7,110
150	6,480	250	5,840
200	5,180	300	3,750
250	2,860	310	3,050
260	1,830	320	1,950
C_7H_{14} , метилциклогексан [13]		C_8H_{10} , м-ксилол [35]	
—120	9,670	—40	10,700
—100	9,530	30	10,140
0	8,660	100	9,310
100	7,580	150	8,570
150	6,860	200	7,690
200	5,890	250	6,610
250	4,450	300	4,900
280	3,040	330	3,180
290	2,260	340	2,100
C_7H_{14} , 1,1-диметилциклопентан [13]		C_8H_{10} , этилбензол [13]	
—60	8,890	—90	10,070
0	8,360	0	11,350
50	7,800	100	9,080
100	7,140	150	8,390
150	6,290	200	7,580
200	5,100	250	6,500
250	3,070	300	4,860
260	2,320	330	3,100
		340	2,030

$t, ^\circ\text{C}$	$L_{\text{кип}}$ ккал/моль	$t, ^\circ\text{C}$	$L_{\text{кип}}$ ккал/моль
C_8H_8 , винилбензол (стирол) [13]		Силикон (диэтилполисилоксан) [35]	
—30	10,820	0	31,4
30	10,290	20	31,2
100	9,510	40	31,1
200	8,020	60	31,0
250	6,980	80	30,9
300	5,440	100	30,7
340	3,390	120	30,6
350	2,440	140	30,5
C_9H_{12} , изопропилбензол (кумол) [13]		160	30,4
—90	11,780	180	30,2
0	10,950	200	30,1
100	9,780	220	30,0
200	8,300	240	29,8
250	7,260	260	29,6
300	5,760	280	29,3
350	3,020	290	29,2
360	1,600	300	29,1
$\text{C}_{12}\text{H}_{10}$, дифенил [35]		Даутерм (дифенильная смесь*) [35]	
260	11,55	20	90
280	10,78	60	86
310	10,01	90	83,5
340	9,394	120	80,5
350	9,163	150	78,5
$\text{C}_{15}\text{H}_{16}$, моноизопропил- дифенил [35]		180	76,5
100	15,092	210	74
140	14,70	240	71
180	14,31	260	68,5
220	14,11	280	65,5
260	13,52	300	63
300	12,94	320	60,5
320	12,54	340	58
340	11,96	360	55
360	11,37	380	52,5
380	10,78	390	51
400	10,0	400	49,5

* Эвтектическая, состав: 73,5% дифенилового эфира + 26,5% дифенила.

11.4. КИПЕНИЕ И ЗАТВЕРДЕВАНИЕ РАСТВОРОВ

Температура затвердевания (кристаллизации) $T_{\text{кр.р}}$ раствора меньше температуры затвердевания $T_{\text{кр}}$ чистого растворителя; температура кипения $T_{\text{кип.р}}$ раствора больше температуры кипения $T_{\text{кип}}$ растворителя. Это явление наблюдается при любых растворителях для нелетучих растворяемых веществ и описывается криоскопической $K_{\text{кр}}$ и эбуллиоскопической $K_{\text{э}}$ постоян-

ными растворителя. Криоскопическая постоянная растворителя определяется разностью температур затвердевания $\Delta T = T_{\text{кр}} - T_{\text{кр.р}}$, которая наблюдается при растворении в 1000 г растворителя 1 моля любого нелетучего вещества. Эбуллиоскопическая постоянная определяется аналогично разностью $\Delta T = T_{\text{кип}} - T_{\text{кип.р}}$. При этом

$$K_{\text{кр}} = -RT_{\text{кр}}^2 / (1000 L_{\text{кр}}); \quad K_{\text{э}} = RT_{\text{кип}}^2 / (1000 L_{\text{кип}}),$$

где R — газовая постоянная; $L_{\text{кр}}$ — удельная теплота отвердевания; $L_{\text{кип}}$ — удельная теплота испарения при температуре кипения.

В табл. 11.11 и 11.12 приведены криоскопические и эбуллиоскопические постоянные некоторых растворителей.

При кипении и затвердевании происходит в общем случае изменение состава фаз. Не изменяют своего состава при кипении азеотропные растворы (табл. 11.13).

Таблица 11.11

Криоскопические $K_{\text{кр}}$ и эбуллиоскопические $K_{\text{э}}$
постоянные неорганических растворителей,
мол.%/град [10]

Растворитель	$K_{\text{кр}}$	Растворитель	$K_{\text{кр}}$
AlBr_3	26,8	NaCl	18,0
AsBr_3	18,2	NaOH	20,8
BaCl_2	108	Na_2SO_4	44
Br_2	8,31	POCl_3	7,57
CaCl_2	38	P_2O_5	11,45
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	4,73	SrCl_2	107
HBr	9,41	Растворитель	
HCl	4,98	$K_{\text{э}}$	
HI	20,26	AsCl_3	7,1
H_2O	1,853	Br_2	5,2
H_2O_2	2,0	Cl_2	1,73
H_2S	3,83	HBr	1,50
H_2SO_4	6,17	HCl	0,64
HgBr_2	36,7	HF	1,9
HgCl_2	34,0	HI	2,83
I_2	20,4	H_2O	0,513
K_2CO_3	41	H_2SO_4	5,33
KCl	25	Hg	11,4
KNO_3	14,0	I_2	10,5
NH_3	0,97	NH_3	0,34
NH_4NO_3	22,1	PCl_3	5,0
N_2O_4	4,1	SO_2	1,45
Na_2CO_3	30,0	SnCl_4	10,2

Таблица 11.12

Криоскопические $K_{\text{кр}}$ и эбуллиоскопические $K_{\text{э}}$
постоянные органических растворителей,
мол.%/град [10]

Формула	Название	$K_{\text{кр}}$	$K_{\text{э}}$
$\text{C}_{12}\text{H}_{10}\text{N}_2$	Азобензол	8,35	—
$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$	Амилловый спирт, третич- ный	—	2,26
$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	Анилин	5,87	3,69
$\text{C}_2\text{H}_5\text{ON}$	Ацетамид	363	—

Формула	Название	$K_{кр}$	K_a
C_3H_6O	Ацетон	—	1,48
$C_{14}H_{10}O_2$	Бензил	10,5	10,3
$C_7H_6O_2$	Бензойная кислота	8,788	—
C_6H_6	Бензол	5,069	—
$C_{14}H_{10}O$	Бензофенон	9,8	—
C_9H_9Br	Бромистый этил	—	2,53
$CHBr_3$	Бромформ	14,4	—
C_7H_7Br	<i>n</i> -Бромтолуол	8,21	—
C_6H_5OBr	<i>n</i> -Бромфенол	11,2	—
C_4H_7O	Бутиловый спирт, третич- ный	8,30	1,77
C_6H_{14}	Гексан	—	2,78
C_7H_{16}	Гептан	—	4,225
$C_6H_4Br_2$	<i>n</i> -Дибромбензол	12,4	—
$C_{12}H_{10}$	Дифенил	8,0	7,06
$C_{12}H_{11}N$	Дифениламин	8,6	—
$C_{13}H_{12}$	Дифенилметан	6,72	—
$C_2H_4Cl_2$	1,1-Дихлорэтан	—	3,20
$C_2H_4Cl_2$	1,2-Дихлорэтан	—	3,12
$C_5H_{11}O$	Изоамиловый спирт	—	2,58
$C_4H_{10}O$	Изобутиловый спирт	—	1,94
C_9H_8	Инден	7,28	—
CH_3I	Иодистый метил	—	4,19
C_2H_5I	Иодистый этил	—	5,01
$C_{10}H_{16}O$	Камфара	39,8	6,09
C_7H_6O	<i>o</i> -Креозол	5,62	—
C_7H_6O	<i>n</i> -Креозол	7,7	—
$C_4H_6O_2$	Масляная кислота	—	3,94
$C_{10}H_{20}O$	Ментол	12,4	6,15
$C_7H_6O_2$	Метилацетат	—	2,06
CH_4O	Метиловый спирт	—	0,84
CH_2O_2	Муравьиная кислота	2,77	2,4
$C_{10}H_8$	Нафталин	6,899	5,80
$C_6H_5NO_2$	Нитробензол	8,1	5,27
$C_{10}H_7NO_2$	α -Нитронафталин	9,1	—
$C_7H_7NO_2$	<i>o</i> -Нитротолуол	7,18	—
$C_7H_7NO_2$	<i>m</i> -Нитротолуол	6,78	—
$C_7H_7NO_2$	<i>n</i> -Нитротолуол	7,8	—
$C_6H_7NO_2$	<i>o</i> -Нитрофенол	7,44	—
C_5H_5N	Пиридин	4,97	2,686
C_3H_8O	Пропиловый спирт	—	1,73
$C_3H_6O_2$	Пропионовая кислота	—	3,51
CS_2	Сероуглерод	—	2,29
CCl_4	Углерод четыреххлорис- тый	29,8	5,3
$C_2H_4O_3$	Уксусная кислота	3,9	3,07
$C_4H_6O_3$	Уксусный ангидрид	—	3,53
C_6H_6O	Фенол	7,27	3,60
C_6H_6Cl	Фосген	—	2,9
$C_{10}H_7Cl$	β -Хлорнафталин	9,76	—
$C_6H_4NO_2Cl$	<i>o</i> -Хлорнитробензол	7,50	—
$C_6H_4NO_2Cl$	<i>m</i> -Хлорнитробензол	6,07	—
$C_6H_4NO_2Cl$	<i>n</i> -Хлорнитробензол	10,2	—
$CHCl_3$	Хлороформ	4,9	3,802
C_7H_7Cl	<i>n</i> -Хлортолуол	5,6	—
$C_2H_3O_2Cl$	Хлоруксусная кислота	5,12	—
C_6H_5OCl	<i>o</i> -Хлорфенол	7,72	—
C_6H_{12}	Циклогексан	20,2	2,72
$C_6H_{12}O$	Циклогексанол	38,28	—
C_2H_6O	Этиловый спирт	—	1,04
C_2H_6O	Этилформиат	—	2,18
C_2H_6O	Этилацетат	—	2,83

Температура кипения азеотропных двухкомпонентных смесей [10]

Первая компонента	Вторая компонента		$t_{кип}, ^\circ C$
	Наименование	Содержание в смеси, вес. %	
Вода	Хлористый водород	61,3	20,7
»	Этиловый эфир	1,3	34,15
»	Пентан	1,4	34,6
»	Сероуглерод	1,4	37,7
»	Дихлорметан	1,5	38,1
Этанол	Сероуглерод	9	42,4
Вода	Этилформиат	5	52,6
Метанол	Хлороформ	12,5	53,5
»	Метилацетат	19	54
»	Четыреххлористый углерод	20,6	55,7
Вода	Метилацетат	5,0	56,1
»	Хлороформ	2,6	56,2
Этанол	Метанол	39,6	58,3
Этанол	Хлороформ	7	59,3
Вода	Гексан	5,6	61,6
Метанол	Этилацетат	44	65
Этанол	Четыреххлористый углерод	15,9	65
Вода	»	4,1	66
Этанол	Бензол	32,4	68,2
Вода	»	8,83	69,25
»	Этилацетат	8,47	70,38
»	Циклогексан	10	70,8
»	Изопропилформиат	23	71,6
Этанол	Этилацетат	30,8	71,8
»	1,2-Дихлорэтан	19,5	72
Вода	Анилин	81,8	75
»	Ацетонитрил	16,3	76,5
Этанол	Толуол	68	76,7
Вода	Этанол	4,43	78,17
»	Гептан	12,9	79,2

Первая компонента	Вторая компонента		$t_{\text{кип}}^{\circ}\text{C}$
	Наименование	Содержание в смеси, вес. %	
Вода	Третичный бутанол	11,76	79,9
»	1,2-Диметилпропан	11	80
»	Изопропанол	12,1	80,38
»	Вторичный бутанол	26,8	87
»	Пропанол	28,31	87,72
»	Аллиловый спирт	27,7	88,89
»	Изобутанол	33,2	89,92
»	Хлорбензол	28,4	90,2
»	Бутанол	42,5	92,7
»	Пиридин	41,3	93,6
»	м-Ксилол	40	94,5
»	Хлораль	7	95
»	Изоамиловый спирт	49,6	95,15
»	Амиловый спирт	54,4	95,8
»	Изомасляная кислота	71,8	98,8
»	Масляная кислота	81,5	99,4
»	Фенол	90,79	99,52
»	Бензиловый спирт	91,4	99,9
»	Трифторуксусная кислота	21	105
»	Муравьиная кислота	25,5	107,65

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Landolt-Börnstein. Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Geophysik, Astronomie, Technik. 4 Teil. Berlin, Springer-Verlag, 1961.
2. Selected Values of Chemical Thermodynamic Properties, Circular NBS No. 500. Washington, 1952.
3. Kelley K. K. Contributions to the Data on Theoretical Metallurgy. V. X. Washington, 1949.
4. Kelley K. K. Contributions to the Data on Theoretical Metallurgy. V. V. Bulletin 393. Washington, 1936.
5. Kelley K. K. Contributions to the Data on Theoretical Metallurgy V. III. Bulletin 383. Washington, 1935.
6. Kubaschewski O., Evans E. L. Metallurgical Thermochemistry. Berlin, 1959.

7. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. Изд. 2-е. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1963.
8. Smithsonian Physical Tables. 9th ed. Washington, 1954.
9. Kubaschewski O., Evans E. L. Metallurgical Thermochemistry. London, 1951.
10. Справочник химика. Под ред. Б. П. Никольского. Т. 1, М.—Л., «Химия», 1963.
11. Редкие металлы. Справочник. Пер. с англ. Под ред. В. Е. Плющева. М., «Мир», 1965.
12. Методы измерения температур. Т. 1—2. Сб. статей. Под ред. В. А. Соколова. М., Изд-во иностр. лит., 1954.
13. Физико-химические свойства индивидуальных углеводородов. Под ред. В. М. Татевского. М., Гостоптехиздат, 1960.
14. Яковкин Г. А. Фреоны. Свойства и применения. Л., Изд. ГИПХ, 1959.
15. O'Hara J. B., Fahien R. W.—Ind. Engl. Chem., 1951, v. 43, p. 2924.
16. Glasgow A. R.—Analyt. Chem., 1948, v. 20., p. 410.
17. Streiff A. J.—J. Res. Nat. Bur. Stand., 1947, v. 38, p. 53.
18. Glasgow A. R.—J. Res. Nat. Bur. Stand., 1946, v. 37, p. 141.
19. Streiff A. J.—J. Res. Nat. Bur. Stand., 1948, v. 41, p. 323.
20. Todd S. S., Oliver G. D., Huffman H. M.—J. Amer. Chem. Soc., 1947, v. 69, p. 1519.
21. Streiff A. J.—J. Res. Nat. Bur. Stand., 1946, v. 37, p. 331.
22. Streiff A. J.—J. Res. Nat. Bur. Stand., 1950, v. 45, p. 173.
23. Selected Values of Chemical Thermodynamic Properties. Circular of the NBS. Washington, 1947.
24. Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей. М., «Химия», 1966.
25. Краткий справочник физико-химических величин. Под ред. К. П. Мищенко и А. А. Равделя. Изд. 3-е. Л., Госхимиздат, 1959.
26. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963. Авт.: Малков М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г., Фрадков А. Б.).
27. Фастовский В. Г., Ровинский А. Е., Петровский Ю. В. Инертные газы. М., Атомиздат, 1964.
28. Справочник по машиностроительным материалам. Т. 1, 2. М., Машгиз, 1959.
29. Головин В. А., Ульянова Э. Х. Свойства благородных металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1964.
30. Славин Д. О., Штейман Е. Б. Металлы и сплавы в химическом машиностроении и аппаратостроении. М., Машгиз, 1951.
31. Натрий и калий. Л., Госхимиздат, 1959. (Авт.: Алабышев А. Ф., Грачев К. Я., Зарецкий С. А., Лантратов М. Ф.)
32. Чететкин А. В. Высокотемпературные теплоносители. М.—Л., Госэнергоиздат, 1962.
33. Самсонов Г. В. Тугоплавкие соединения. М., Металлургиздат, 1963.
34. Теплофизические свойства веществ. Под ред. Н. Б. Варгафтика. М., Госэнергоиздат, 1956.
35. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963.
36. Tables of Thermal Properties of Gases. Circular of the NBS. Washington, 1955.
37. Воляк Л. Д.—«Теплоэнергетика», 1958, № 7, с. 33.
38. Бадильес И. С. Холодильная техника. Энциклопедический словарь. Т. 1. М., Госторгиздат, 1960.

ГЛАВА 12 ДАВЛЕНИЕ ПАРА РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ

12.1. ВОДА И РТУТЬ

Таблица 12.1

Давление пара воды, кг/см^2 [1]

$t, ^\circ\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,006228	0,006695	0,007193	0,007724	0,008289	0,008891	0,009532	0,010210	0,010932	0,011699
10	0,012513	0,013376	0,014292	0,015262	0,016289	0,017377	0,018528	0,019746	0,02103	0,02239
20	0,02383	0,02535	0,02695	0,02863	0,03041	0,03229	0,03426	0,03634	0,03853	0,04083
30	0,04325	0,04580	0,04847	0,05128	0,05423	0,05733	0,06057	0,06398	0,06755	0,07129
40	0,07520	0,07931	0,08360	0,08809	0,09279	0,09771	0,10284	0,10821	0,11382	0,11967
50	0,12578	0,13216	0,13880	0,14574	0,15297	0,16050	0,16835	0,17653	0,18504	0,19390
60	0,2031	0,2127	0,2227	0,2330	0,2438	0,2550	0,2666	0,2787	0,2912	0,3043
70	0,3178	0,3318	0,3463	0,3613	0,3769	0,3931	0,4098	0,4272	0,4451	0,4637
80	0,4829	0,5028	0,5234	0,5447	0,5667	0,5894	0,6129	0,6372	0,6623	0,6882
90	0,7148	0,7424	0,7710	0,8004	0,8307	0,8619	0,8942	0,9274	0,9616	0,9971
100	1,0332	1,0707	1,1092	1,1489	1,1898	1,2318	1,2751	1,3196	1,3654	1,4125
110	1,4609	1,5106	1,5618	1,6144	1,6684	1,7239	1,7809	1,8394	1,8995	1,9612
120	2,0245	2,0895	2,1561	2,2245	2,2947	2,3666	2,4404	2,5160	2,5935	2,6730
130	2,7544	2,8378	2,9233	3,011	3,101	3,192	3,286	3,382	3,481	3,582
140	3,685	3,790	3,898	4,009	4,121	4,237	4,355	4,476	4,599	4,725
150	4,854	4,985	5,119	5,257	5,397	5,540	5,686	5,836	5,988	6,144
160	6,302	6,464	6,630	6,798	6,970	7,146	7,325	7,507	7,693	7,883
170	8,076	8,274	8,475	8,679	8,888	9,101	9,317	9,538	9,763	9,992
180	10,225	10,462	10,703	10,950	11,201	11,456	11,715	11,979	12,248	12,522
190	12,800	13,083	13,371	13,664	13,962	14,265	14,573	14,886	15,204	15,528
200	15,857	16,192	16,532	16,877	17,228	17,585	17,948	18,316	18,690	19,070
210	19,456	19,848	20,246	20,651	21,061	21,477	21,901	22,531	22,767	23,209
220	23,659	24,115	24,577	25,047	25,523	26,007	26,497	26,995	27,499	28,011
230	28,531	29,057	29,591	30,133	30,682	31,239	31,803	32,376	32,855	33,544
240	34,140	34,745	35,357	35,978	36,607	37,244	37,890	38,545	39,208	39,880
250	40,56	41,25	41,95	42,66	43,37	44,10	44,83	45,58	46,33	47,09
260	47,87	48,65	49,44	50,24	51,05	51,87	52,71	53,55	54,40	55,26
270	56,14	57,02	57,91	58,82	59,73	60,66	61,60	62,55	63,51	64,48
280	65,46	66,45	67,46	68,47	69,50	70,54	71,59	72,65	73,73	74,82
290	75,92	77,03	78,15	79,29	80,44	81,60	82,78	83,97	85,17	86,38
300	87,61	88,85	90,11	91,38	92,66	93,95	95,26	96,59	97,92	99,28
310	100,64	102,02	103,42	104,83	106,25	107,69	109,15	110,62	112,11	113,61
320	115,12	116,66	118,21	119,77	121,35	122,95	124,56	126,19	127,84	129,50
330	131,18	132,88	134,59	136,33	138,08	139,85	141,63	143,44	145,26	147,10
340	148,96	150,84	152,73	154,65	156,59	158,54	160,52	162,52	164,53	166,57
350	168,63	170,71	172,81	174,93	177,07	179,24	181,43	183,64	185,66	188,13
360	190,42	192,72	195,06	197,41	199,80	202,21	204,64	207,11	209,60	212,12
370	214,68	217,26	219,88	222,53	225,22	—	—	—	—	—

Таблица 12.2

Давление пара ртути
При низких температурах [2]

$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{мм рт. ст.}$	$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{мм рт. ст.}$	$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{мм рт. ст.}$	$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{мм рт. ст.}$
—89	10^{-10}	—42	10^{-6}	46	10^{-2}	254	100
—79	10^{-9}	—25	10^{-5}	82	10^{-1}	357	760
—68	10^{-8}	—6	10^{-4}	125	1,0		
—55	10^{-7}	17	10^{-3}	202	10		

При высоких температурах

$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{атм}$	$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{атм}$	$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{атм}$	$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{атм}$	$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{атм}$	$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{атм}$
400	2,1 [3] 2 [4]	550	13,8 [3] 12 [4]	700	50 [3] 46 [4]	850	137,5 [3] 115 [4]	1000	260 [4] 330 [4]	1250	825 [4] 1300 [4]
450	4,25 [3] 4 [4]	600	22,3 [3] 22 [4]	750	72 [3] 63 [4]	880	162 [3] 900 [4]	1100	425 [4] 1150 [4]	1350	1265 [4] 1400 [4]
500	8 [3] 7 [4]	650	34 [3] 34 [4]	800	102 [3] 86 [4]	950	195 [4]	1200	665 [4]	1435	2020 [4]

12.2. ЭЛЕМЕНТЫ И ПРОСТЕЙШИЕ СОЕДИНЕНИЯ

Таблица 12.3

Температуры, $^\circ\text{K}$, при которых устанавливается указанное давление паров элементов и некоторых простейших соединений (ниже 1 мм рт. ст.)

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.											Литература
		10^{-10}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1,0	
Азот	N_2	—	—	23,7	25,2	27,0	29,0	31,4	34,1	37,5	41,7	47,0	[5]
Алюминий	Al	824	868	917	974	1039	1114	1200	1301	1421	1566	1745	[2]
Алюминий фтористый	AlF	—	—	—	—	—	—	805	962	1028	1103	—	[6]
Алюминий четырех-фтористый	AlF_4	—	—	—	—	—	—	—	973	1032	1099	1175	[7]
Аммиак	NH_3	—	—	90,6	95,9	102,0	108,5	116,5	125,5	136,0	148,0	163,0	[5]
Аргон	Ar	—	—	26,8	28,6	30,6	33,1	35,9	39,2	43,2	48,2	54,4	[5]
Барий	Ba	497	526	558	595	638	687	744	812	895	997	1134	[2]
Бериллий	Be	871	918	971	1030	1097	1173	1261	1364	1485	1634	1821	[2]
Бериллий фтористый	BeF_2	—	—	—	—	—	—	—	831	893	963	—	[8]
Бериллия окись	BeO	—	—	—	—	—	2070	2207	2365	2546	—	—	[9]
Бор	B	1468	1543	1626	1718	1821	1939	2072	2226	2409	2631	2898	[2]
Бора окись	B_2O_3	—	—	—	—	—	—	1250	1351	1468	1609	—	[9]
Бром	Br_2	—	—	128,5	135,5	143,5	152,5	163,0	174,5	188,5	204,0	224,0	[5]
Ванадий	V	1292	1358	1431	1513	1604	1708	1826	1963	2123	2317	2555	[2]
Висмут	Bi	484	501	521	543	569	600	638	688	760	887	1040	[2]
Вода	H_2O	—	—	144,5	153,0	162,0	173,0	185,0	198,5	215,0	223,0	256,0	[5]
Водород	H_2	—	—	3,71	4,03	4,40	4,84	5,38	6,05	6,90	8,03	9,55	[5]
Водород бромистый	HBr	—	—	67,6	72,1	77,1	82,9	89,6	97,5	107,0	118,5	132,5	[5]
» фтористый	HF	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	179	[5]
» хлористый	HCl	—	—	64,1	68,1	72,5	77,6	83,4	90,1	98,1	108,5	121,0	[5]
Вольфрам	W	2154	2263	2383	2517	2667	2837	3029	3249	3502	3798	4147	[2]
Гадолиний	Gd	578	609	644	684	728	779	838	906	986	1082	1199	[2]
Галлий	Ga	749	792	840	893	954	1024	1106	1201	1315	1453	1625	[2]
Гафний	Hf	1690	1780	1880	1990	2117	2260	2430	2627	2860	3143	3478	[2]
Гелий	He	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,980	1,268	[5]
Германий	Ge	985	1036	1092	1157	1230	1319	1422	1543	1687	1861	2075	[2]
Германий сернистый	GeS	—	—	—	—	—	—	586	625	668	—	—	[10]
» двухсернистый	GeS_2	—	—	—	—	—	—	—	707	759	803	885	[11]
Европий	Eu	503	532	566	599	640	687	741	805	881	975	1093	[2]
Железо	Fe	1019	1072	1131	1197	1271	1356	1453	1566	1698	1859	2063	[2]
Золото	Au	973	1026	1085	1151	1226	1311	1413	1533	1676	1847	2059	[2]
Индий	In	663	700	745	794	850	914	989	1078	1185	1315	1478	[2]
Иод	I_2	161	169	178	188	199	212	226	242	262	285	312	[2]
Иридий	Ir	1568	1648	1737	1835	1944	2071	2214	2379	2570	2798	3082	[2]
Иттербий	Yb	470	496	526	561	599	644	695	757	830	920	1032	[2]
Иттрий	Y	993	1046	1105	1171	1246	1392	1430	1544	1678	1842	2048	[2]
Кадмий	Cd	310	327	346	368	393	421	454	492	538	594	667	[2]
Кадмий мышьяковис-тый	CdAs_2	—	—	—	—	—	514	548	587	631	683	—	[12]
Кадмий селенный	CdSe	—	—	—	—	—	—	798	861	934	1021	—	[13]
» теллуристый	CdTe	—	—	—	—	—	—	719	778	847	930	—	[14]
» хлористый	CdCl_2	—	—	—	—	339	366	398	436	483	542	617	[5]
Калий	K	262,6	278,1	295,6	315,1	338,5	365,6	397,7	438,0	482,9	542	617	[2]
Калий	K_2	349	369	392	418	448	483	524	573	633	707	804	[2]

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.											Литера- тура
		10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1,0	
Калий хлористый	KCl	—	—	—	—	—	729	781	842	912	993	1090	[18]
Кальций	Ca	490	518	549	585	625	672	726	790	867	962	1081	[2]
Кислород	O ₂	—	—	28,2	29,9	31,9	34,1	36,7	39,8	43,3	48,1	54,1	[5]
Кобальт	Co	886	930	978	1033	1095	1166	1247	1342	1454	1586	1744	[2]
Кремний	Si	970	1020	1075	1136	1204	1282	1370	1475	1600	1750	1938	[2]
Кремния окись	SiO ₂	—	—	—	—	—	1489	1635	1814	—	—	—	[9]
Кригтон	Kr	—	—	36,8	39,3	42,2	45,5	49,4	53,9	59,4	66,3	74,8	[5]
Ксенон	Xe	—	—	50,8	54,2	58,2	62,7	68,1	74,4	82,1	91,5	103,5	[5]
Лантан	La	1130	1192	1263	1343	1485	1540	1661	1803	1972	2177	2429	[2]
Лантана хлорид	LaCl ₃	—	—	—	808	853	904	960	1025	1098	1183	—	[19]
Литий	Li	451	477	507	541	579	623	675	737	811	902	1017	[2]
	Li ₂	553	584	618	658	702	754	814	885	970	1075	1207	[2]
Литий фтористый	LiF	—	—	—	—	—	675	737	811	902	1017	—	[20]
» хлористый	LiCl	—	—	—	—	—	—	—	792	859	938	—	[21]
Лития окись	Li ₂ O	—	—	—	—	—	—	—	1377	1489	1620	—	[22]
Лютеций	Lu	841	886	937	993	1057	1130	1213	1310	1424	1560	1726	[2]
Магний	Mg	407	430	455	484	517	554	598	649	710	783	875	[2]
Марганец	Mn	738	777	820	869	924	988	1060	1146	1247	1369	1522	[2]
Медь	Cu	897	945	1000	1060	1130	1207	1298	1406	1537	1692	1890	[2]
Метан	CH ₄	—	—	32,0	34,2	36,9	39,9	43,5	47,7	52,9	59,2	67,3	[5]
Молибден	Mo	1677	1764	1861	1969	2090	2228	2386	2572	2797	3046	—	[2]
Мышьяк	As	747	779	812	846	881	937	1012	1110	1246	1440	1696	[2]
	As ₂	492	515	545	578	613	649	686	722	758	793	827	[2]
	As ₄	342	359	377	397	420	445	474	507	545	590	644	[2]
Натрий	Na	309	327	347	370	397	428	465	509	562	628	712	[2]
	Na ₂	379,3	401,3	426,0	454,1	486,2	523	567	618	680	757	855	[2]
Натрий фтористый	NaF	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1205	1320	[23]
Неодим	Nd	895	946	1004	1070	1144	1231	1335	1463	1618	1808	2049	[2]
Неон	Ne	—	—	7,34	7,87	8,48	9,19	10,05	11,05	12,30	13,85	15,80	[5]
Никель	Ni	855	898	946	1000	1061	1129	1207	1296	1402	1528	1681	[2]
Ниобий	Nb	1820	1950	2091	2125	2250	2400	2560	2750	2980	3250	3570	[2]
Олово	Sn	855	905	961	1024	1096	1179	1275	1387	1521	1685	1890	[2]
Осмий	Os	1805	1896	1996	2108	2234	2375	2535	2719	2932	3193	3512	[2]
Палладий	Pd	1056	1114	1180	1253	1336	1430	1539	1667	1820	2011	2246	[2]
Платина	Pt	1403	1475	1555	1644	1744	1858	1988	2140	2322	2540	2804	[2]
Полоний	Po	356	375	396	421	448	479	515	560	616	684	771	[2]
	Po ₂	364	383	404	427	453	483	517	564	623	698	796	[2]
Радий	Ra	462	489	519	553	593	638	691	754	832	928	1058	[2]
Рений	Re	1982	2085	2201	2332	2480	2649	2844	3069	3333	3648	4036	[2]
Родий	Rh	1395	1467	1546	1635	1735	1847	1976	2124	2303	2529	2794	[2]
Ртуть	Hg	184	194	205	218	231	248	267	290	319	355	398	[2]
Рубидий	Rb	239	253	270	288	310	335	364	400	443	497	568	[2]
	Rb ₂	319,0	337,2	357,9	381,5	408,8	440,7	478,6	—	581	652	744	[2]
Рубидий хлористый	RbCl	—	—	—	—	—	—	—	807	876	958	1058	[24]
Рутений	Ru	1657	1741	1833	1936	2051	2180	2328	2496	2692	2929	3213	[2]
Самарий	Sm	577	610	646	687	733	786	846	917	1001	1103	1229	[2]
Свинец	Pb	551	583	619	660	708	762	827	903	995	1110	1254	[2]
Свинец фтористый	PbF ₂	—	—	—	—	—	—	737	801	879	973	1089	[25]
Свинца окись	PbO	—	—	—	—	—	—	892	953	1023	1105	1200	[26]
Селен	Se	546	576	610	648	691	741	798	867	948	1047	1170	[2]
	Se ₂	—	351	369	389	410	435	464	497	539	590	652	[2]
	Se ₆	—	346	362	379	398	419	443	471	508	561	629	[2]
	Σ Se*	—	340	357	377	394	417	442	470	504	560	623	[2]
Сера	S	—	—	699	742	790	846	911	988	1080	1190	1330	[2]
	S ₂	—	—	347	366	387	411	439	472	511	557	613	[2]
	S ₈	—	—	261	278	294	312	332	355	380	413	458	[2]
	Σ S*	231	245	260	275	292	310	330	352	377	410	455	[2]
Серебро	Ag	759	800	846	898	957	1024	1101	1191	1301	1436	1603	[2]
Сероводород	H ₂ S	—	—	73,5	78,0	83,1	89,0	95,7	103,5	113,5	124,5	138,5	[5]
Скандий	Sc	885	912	987	1045	1110	1187	1275	1375	1497	1636	1820	[2]
Стронций	Sr	457	483	512	545	582	625	676	735	806	894	1006	[2]
Сурьма	Sb	693	730	770	818	870	933	1008	1097	1204	1334	1498	[2]
	Sb ₂	579	608	641	677	717	763	816	877	958	1063	1198	[2]

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.											Литература
		10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1,0	
Таллий	Sb ₄	486	516	547	580	617	656	700	749	808	880	1024	[2]
	Σ Sb*	486	516	547	580	617	656	700	749	808	880	1024	[2]
Тантал	Ta	2015	2120	2237	2366	2511	2675	2862	3077	3329	3625	3978	[2]
Теллур	Te ₂	403	423	445	469	497	527	562	602	649	705	790	[2]
Титан	Ti	1207	1270	1340	1419	1508	1609	1726	1861	2021	2219	2264	[2]
Торий	Th	—	—	1706	1813	1935	2075	—	—	—	—	—	[27]
Тулий	Tu	661	696	734	778	827	885	953	1025	1121	1237	—	[2]
Углекислый газ	CO ₂	—	—	76,1	80,6	85,7	91,5	98,1	106,0	114,5	125,0	137,5	[5]
Углерод	C ₁	1781	1870	1968	2077	2200	2336	2491	2669	2874	3114	3397	[2]
	C ₂	1920	2010	2109	2218	2339	2475	2628	2802	3001	3232	3502	[2]
	C ₃	1716	1791	1873	1962	2061	2171	2293	2430	2586	2763	2968	[2]
Углерода окись	CO	—	—	26,7	28,4	30,3	32,5	35,0	38,0	41,5	45,8	51,1	[5]
Уран	U	1265	1337	1409	1498	1600	1717	1854	2014	2206	2439	2729	[2]
Урана двуокись	UO ₂	—	—	1592	1682	1780	1894	2023	—	—	—	—	[28]
Урани пятифтористый	α-UF ₅	—	—	—	—	—	—	—	—	—	340**	385**	[29]
» четырехфтористый	UF ₄	—	—	—	—	—	—	—	—	1080	1157	1250	[30]
Фосфор красный	P ₁	942	990	1045	1106	1174	1250	1337	1435	1547	1675	1822	[2]
	P ₂	427	448	470	496	524	556	592	633	680	735	800	[2]
	P ₄	299	312	327	343	361	380	403	428	457	491	530	[2]
» белый	P ₄	156	166	178	191	205	220	238	259	282	311	348	[2]
Франций	Fr	206	21	232	248	267	289	315	346	385	434	497	[2]
Фтор	F ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50,5	[5]
Хлор	Cl ₂	—	—	84,4	89,4	95,1	101,5	109,5	117,5	127,5	140,0	155,0	[5]
Хром	Cr	986	1037	1094	1158	1229	1311	1403	1511	1637	1786	1968	[2]
Хрома окись	Cr ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	1730	1858	2005	2177	2382	[31]
Цезий	Cs	227	241	257	274	295	319	348	382	424	476	545	[2]
Цезий хлористый	CsCl	—	—	—	—	—	—	715	770	835	911	1003	[24]
Цинк	Zn	358	377	399	424	453	485	523	566	618	681	763	[2]
Цинк мышьяковистый	Zn ₃ As ₂	—	—	—	—	575	616	663	718	784	—	—	[13]
» селенистый	ZnSe	—	—	—	—	—	—	919	982	1055	1140	—	[32]
» сернистый	ZnS	—	—	—	—	—	—	—	—	1141	1270	1430	[33]
» теллуристый	ZnTe	—	—	—	—	—	—	785	848	921	1008	—	[14]
Цирконий	Zr	1578	1662	1754	1858	1975	2109	2265	2447	2662	2918	3227	[2]

* При суммарном давлении.

** При давлении диспропорционирования.

12.3. НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА

Температуры, °С, при которых устанавливается указанное давление паров неорганических веществ (ниже 1 атм)*

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С	Литература
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760		
Азот	N ₂	-226,1	-221,3	-219,1	-216,8	-214,0	-212,3	-209,7	-205,6	-200,9	-195,8	-210,0	[34]
Азота закись	N ₂ O	-143,4	-133,4	-128,7	-124,0	-118,3	-114,9	-110,3	-103,6	-96,2	-88,5	-90,9	[34]
» окись	NO	-184,5	-180,6	-178,2	-175,3	-171,7	-168,9	-166,0	-162,3	-156,8	-151,7	-161,0	[34]
» фторокись	NO ₂ F	-143,7	-132,1	-126,2	-119,8	-112,8	-108,4	-102,3	-93,5	-83,2	-72,0	-139,0	[34]
» четырехокись	N ₂ O ₄	-55,6	-42,7	-36,7	-30,4	-23,9	-19,9	-14,7	-5,0	+8,0	21,0	-9,3	[34]
Азотный ангидрид	N ₂ O ₅	-36,8	-23,0	-16,7	-10,0	-2,9	+1,8	7,4	15,6	24,4	32,4	30,0	[34]
Азот трехфтористый	NF ₃	-183,8	-175,5	-170,7	-165,7	-160,2	-156,5	-152,3	-145,2	-137,4	-129,0	-183,7	[35]
Алюминий	Al	1472	—	1699	—	—	—	1996	—	—	2348	659	[2]
Алюминий-боргидрид	AlB ₂ H ₁₂	—	-52,2	-42,9	-32,5	-20,9	-13,4	-3,9	+11,2	28,1	45,9	-64,5	[34]
Алюминий бромистый	AlBr ₃	81,3	103,8	118,0	134,0	150,6	161,7	176,1	199,8	227,0	256,3	97,5	[34]
» иодистый	AlI ₃	178,0	207,7	225,8	244,2	265,0	277,8	294,5	322,0	354,0	385,5	—	[34]
» фтористый	AlF ₃	1238	1298	1324	1350	1378	1398	1422	1457	1496	1537	1040	[36]
» хлористый	AlCl ₃	100,0	116,4	123,8	131,8	139,9	145,4	152,0	161,8	171,6	180,2	192,4	[34]
Алюминия окись	Al ₂ O ₃	2148	2306	2385	2465	2549	2599	2665	2766	2874	2977	2050	[34]
Аммиак	NH ₃	-109,1	-97,5	-91,9	-85,8	-79,2	-74,3	-68,4	-57,0	-45,4	-33,6	-77,7	[34]
Аммоний бромистый	NH ₄ Br	198,3	234,5	252,0	270,6	290,0	303,8	320,0	345,3	370,9	396,0	—	[34]
» иодистый	NH ₄ I	210,9	247,0	263,5	282,8	302,8	316,0	331,8	355,8	381,0	404,9	—	[34]
» кислый	NH ₄ HS	-51,1	-36,0	-28,7	-20,8	-12,3	-7,0	0,0	+10,5	21,8	33,3	—	[34]
» сернистый	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
» хлористый	NH ₄ Cl	160,4	193,8	209,8	226,1	245,0	256,2	271,5	293,2	316,5	337,8	520	[34]
» цианистый	NH ₄ CN	-50,6	-35,7	-28,6	-20,9	-12,6	-7,4	-0,5	+9,6	20,5	31,7	36	[34]
Аммония азид	NH ₄ N ₃	29,2	49,4	59,2	69,4	80,1	86,7	95,2	107,7	120,4	133,8	—	[34]
» карбамат	NH ₄ CO ₂ NH ₂	-26,1	-10,4	-2,9	+5,3	14,0	19,6	26,7	37,2	48,0	58,3	—	[34]
Аргон	Ar	-218,2	-213,9	-210,9	-207,9	-204,9	-202,9	-200,5	-195,6	-190,6	-185,6	-189,2	[34]
Астат	At	160	—	206	—	—	—	269	—	—	334	302	[2]
Барий	Ba	—	984	1049	1120	1195	1240	1301	1403	1518	1638	710	[34]
Бериллий	Be	1548	—	1785	—	—	—	2097	—	—	2471	1283	[2]
Бериллий-боргидрид	BeB ₂ H ₈	1,0	19,8	28,1	36,8	46,2	51,7	58,6	69,0	79,7	90,0	123	[34]
Бериллий бромистый	BeBr ₂	289	325	342	361	379	390	405	427	451	474	490	[34]
» иодистый	BeI ₂	283	322	341	361	382	394	411	435	461	487	488	[34]
» хлористый	BeCl ₂	291	328	346	365	384	395	411	435	461	487	405	[34]
Бор	B	2625	—	2957	—	—	—	3381	—	—	3860	2027	[2]
Бор трехфтористый	BF ₃	-154,6	-145,4	-141,3	-136,4	-131,0	-127,6	-123,0	-115,9	-108,3	-100,7	-126,8	[34]
» треххлористый	BCl ₃	-91,5	-75,2	-66,9	-57,9	-47,8	-41,2	-32,4	-18,9	-3,6	+12,7	-107	[34]
Бром	Br ₂	-48,7	-32,8	-25,0	-16,8	-8,0	-0,6	+9,3	24,3	41,0	58,2	-7,26	[37]
Бромдихлорфторсилан	SiBrCl ₂ F	-86,5	-68,4	-59,0	-48,8	-37,0	-29,0	-19,5	-3,2	+15,4	35,4	-112,3	[34]
Бром пятифтористый	BrF ₅	-69,3	-51,0	-41,9	-32,0	-21,0	-14,0	-4,5	+9,9	25,7	40,0	-61,4	[34]
Бромсилан	SiH ₃ Br	—	-85,7	-77,3	-68,3	-57,8	-51,1	-42,3	-28,6	-13,3	+2,4	-93,9	[34]
Ванадий	V	2282	—	2578	—	—	—	2953	—	—	3392	1919	[2]
Ванадилтрихлорид	VOCl ₃	-23,2	+0,2	12,2	26,6	40,0	49,8	62,5	82,0	103,5	127,2	—	[34]

* Буквой Р отмечена температура разложения.

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С	Литература
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760		
Висмут	Bi	767	—	947	—	—	—	1134	—	—	1427	271	[2]
Висмут пятифтористый	BiF ₅	74,8	102,9	116,5	131,1	146,8	156,6	169,6	188,5	209,1	230,0	151,4	[38]
» трехбромистый	BiBr ₃	—	261	282	305	327	340	360	392	425	461	218	[34]
» трехиодистый	BiI ₃	254,3	303,7	327,9	354,3	383,0	401,0	425,3	461,2	500,9	541,7	—	[39]
» треххлористый	BiCl ₃	—	242	264	287	311	324	343	372	405	441	230	[34]
Вода	H ₂ O	—17,3	+1,2	11,3	22,2	34,1	41,6	51,6	66,5	83,0	100,0	0,0	[34]
Водород	H ₂	—263,3	—261,9	—261,3	—260,4	—259,6	—258,9	—257,9	—256,3	—254,5	—252,5	—259,1	[34]
Водорода перекись	H ₂ O ₂	15,3	38,8	50,4	63,3	77,0	85,8	97,9	116,5	137,4P	158,0P	—0,9	[34]
Водород бромистый	HBr	—138,8	—127,4	—121,8	—115,4	—108,3	—103,8	—97,7	—88,1	—78,0	—66,5	—87,0	[34]
» двухсернистый	H ₂ S ₂	—43,2	—24,4	—15,2	—5,1	+6,0	12,8	22,0	35,3	49,6	64,0	—89,7	[34]
» иодистый	HI	—123,3	—109,6	—102,3	—94,5	—85,6	—79,8	—72,1	—60,3	—48,3	—35,1	—50,9	[34]
» мышьяковистый	AsH ₃	—142,6	—130,8	—124,7	—117,7	—110,2	—104,8	—98,0	—87,2	—75,2	—62,1	—116,3	[34]
» селенистый	H ₂ Se	—115,3	—103,4	—97,9	—91,8	—84,7	—80,2	—74,2	—65,2	—53,6	—41,1	—64,0	[34]
» теллуристый	H ₂ Te	—96,4	—82,4	—75,4	—67,8	—59,1	—53,7	—45,7	—32,4	—17,2	—2,0	—49,0	[34]
» фтористый	HF	—94,6	—75,9	—66,8	—58,1	—45,1	—38,0	—28,3	—13,8	+2,5	19,43	—83	[40]
» хлористый	HCl	—150,8	—140,7	—135,8	—130,0	—123,8	—119,8	—114,0	—105,2	—95,3	—84,8	—114,3	[34]
Вольфрам	W	3874	—	4294	—	—	—	4810	—	—	5372	3387	[2]
Вольфрам шестифтористый	WF ₆	—71,4	—56,5	—49,2	—41,5	—33,0	—27,5	—20,3	—10,0	+1,2	17,3	—0,5	[34]
Гадолиний	Gd	926	—	1074	—	—	—	1264	—	—	1497	1327	[2]
Галлий	Ga	1352	—	1573	—	—	—	1871	—	—	2244	30	[2]
Галлий треххлористый	GaCl ₃	48,0	67,8	76,5	91,3	107,5	118,0	132,0	152,8	176,3	200,0	77,0	[34]
Гафний	Hf	3205	—	3702	—	—	—	3837	—	—	5687	2222	[2]
Гафний четыреххлористый	HfCl ₄	170,5	198,7	216,8	230,6	245,2	254,0	265,8	282,5	300,2	317,9	434	[41, 42]
Гексафторидсилан	Si ₂ F ₆	—81,0	—68,8	—63,1	—57,0	—50,6	—46,7	—41,7	—34,2	—26,4	—18,9	—18,6	[34]
Гексахлордисилан	Si ₂ Cl ₆	4,0	27,4	38,8	51,5	65,3	73,9	85,4	102,2	120,6	139,0	—12	[34]
Гексахлордисилоксан	(SiCl ₃) ₂ O	5,0	17,8	29,4	41,5	55,2	63,8	75,4	92,5	113,6	135,6	—33,2	[34]
Гелий	He	—271,7	—271,5	—271,3	—271,1	—270,7	—270,6	—270,3	—269,8	—269,3	—268,6	—272,0	[34]
Германий	Ge	1802	—	2074	—	—	—	2430	—	—	2852	937	[2]
Германий бромистый	GeBr ₄	—	43,3	56,8	71,8	88,1	98,8	113,2	135,4	161,6	189,0	26,1	[34]
» хлористый	GeCl ₄	—45,0	—24,9	—15,0	—4,1	+8,0	16,2	27,5	44,4	63,8	84,0	—49,5	[34]
Германия гидрид	GeH ₄	—163,0	—151,0	—145,3	—139,2	—131,6	—126,7	—120,3	—111,2	—100,2	—88,9	—165	[34]
Гидроксиламин	NH ₂ OH	—	39,0	47,2	55,8	64,6	70,0	77,5	87,9	99,2	110,0	34,0	[34]
Дейтероаммиак	ND ₃	—	—	—	—	—	—74,0	—67,4	—57,0	—45,4	—33,4	—74,0	[34]
Дейтероводород	ND	—	—	—259,8	—259,1	—258,2	—257,6	—256,6	—255,0	—253,0	—251,0	—	[34]
Диборан	B ₂ H ₆	—159,7	—149,5	—144,3	—138,5	—131,6	—127,2	—120,9	—111,2	—99,6	—86,5	—169	[34]
Дибромдифторсилан	SiBr ₂ F ₂	—	—	—66,8	—57,7	—47,4	—41,0	—31,9	—18,2	—2,6	+13,7	—66,9	[34]
Дибромсилан	SiH ₂ Br ₂	—60,9	—40,0	—29,4	—18,0	—5,2	+3,2	14,1	31,6	50,7	70,5	—70,2	[34]
Дибромхлорфторсилан	SiBr ₂ ClF	—65,2	—45,5	—35,6	—24,5	—12,0	—4,7	+6,3	23,0	43,0	59,5	—99,3	[34]
Дигерман	Ge ₂ H ₆	—88,7	—69,8	—60,1	—49,9	—38,2	—30,7	—20,3	—4,7	+13,3	31,5	—109	[34]
Дигидродекаборан	B ₁₀ H ₁₄	60,0	80,8	90,2	100,0	117,4	127,8	142,8	163,8	P	—	99,6	[34]
Дигидропентаборан	B ₅ H ₉	—	—40,4	—30,7	—20,0	—8,0	—0,4	+9,6	24,6	40,8	58,1	—47,0	[34]
Диодисилан	SiH ₂ I ₂	—	3,8	18,0	34,1	52,6	64,0	79,4	101,8	125,5	149,5	—132,5	[34]
Дифторсилан	SiH ₂ F ₂	—146,7	—136,0	—130,4	—124,3	—117,6	—113,3	—107,3	—98,3	—87,6	—77,8	—1,0	[34]
Дисилазан	(SiH ₃) ₃ H	—68,7	—49,9	—40,4	—30,0	—18,5	—11,0	—1,1	+14,0	31,0	48,7	—105,7	[34]
Дисилан	Si ₂ H ₆	—114,8	—99,3	—91,4	—82,7	—72,8	—66,4	—57,5	—44,6	—29,0	—14,3	—132,6	[34]

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Темпера- тура плавления, °С	Лите- ратура
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760		
Дисилоксан	(SiH ₃) ₂ O	—112,5	—95,8	—88,2	—79,8	—70,4	—64,2	—55,9	—43,5	—29,3	—15,4	—144,2	[34]
Дихлордифторсилан	SiCl ₂ F ₂	—124,7	—110,5	—102,9	—94,5	—85,0	—78,6	—70,3	—58,0	—45,0	—31,8	—139,7	[34]
Европий	Eu	820	—	980	—	—	—	1195	—	—	1469	1200	[2]
Железа карбонил	Fe(CO) ₅	—	—6,5	+4,6	16,7	30,3	39,1	50,3	68,0	86,1	105,0	—21,0	[34]
Железо	Fe	1787	1957	2039	2128	2224	2283	2360	2475	2605	2735	1535	[34]
Железо хлористое	FeCl ₂	—	—	700	737	779	805	842	897	961	1026	—	[34]
» хлорное	FeCl ₃	194,7	221,8	235,5	246,0	256,8	263,7	272,5	285,0	298,0	319,0	304	[34]
Золото	Au	1786	—	2055	—	—	—	2412	—	—	2847	1063	[2]
Индий	In	1205	—	1414	—	—	—	1658	—	—	2050	156	[2]
Иод	I ₂	38,7	62,2	73,2	84,7	97,5	105,4	116,5	137,3	159,8	183,0	112,9	[34]
Иод пятифтористый	IF ₅	—23,9	—2,0	+8,7	20,2	32,7	40,6	51,0	66,4	83,2	100,0	9,4	[43]
» семифтористый	IF ₇	—87,0	—70,7	—63,0	—54,5	—45,3	—39,4	—31,9	—20,7	—8,3	+4,0	5,5	[34]
Иодсилан	SiH ₃ I	—	—53,0	—43,7	—33,4	—21,8	—14,3	—4,4	+10,7	27,9	45,4	—57,0	[34]
Иттрий	Y	1775	—	2037	—	—	—	3379	—	—	2772	1490	[2]
Кадмий	Cd	394	455	484	516	553	578	611	658	711	765	320,9	[34]
Кадмий иодистый	CdI ₂	416	481	512	546	584	608	640	688	742	796	385	[34]
» фтористый	CdF ₂	1385	1504	1559	1617	1673	1709	1759	1834	1924	2024	520	[34]
» хлористый	CdCl ₂	—	618	656	695	736	762	797	847	908	967	568	[34]
Кадмия окись	CdO	1000	1100	1149	1200	1257	1295	1341	1409	1484	1559	—	[34]
Калий	K	378	446	480	518	559	600	620	668	723	798	62,3	[44]
Калий бромистый	KBr	795	882	940	994	1050	1087	1137	1212	1297	1383	730	[34]
» едкий	KOH	719	814	863	918	976	1013	1064	1142	1233	1327	380	[34]
» иодистый	KI	745	840	887	938	995	1030	1080	1152	1238	1324	723	[34]
» фтористый	KF	885	988	1039	1096	1156	1193	1245	1323	1411	1502	880	[45]
» хлористый	KCl	821	919	968	1020	1078	1115	1164	1239	1322	1407	790	[34]
Кальций	Ca	808	926	983	1046	1111	1152	1207	1288	1388	1487	851	[34]
Карбонилборин	BH ₃ CO	—139,2	—127,3	—121,1	—114,1	—106,6	—101,9	—95,3	—85,5	—74,8	—64,0	—137,0	[34]
Карбонилхлорид (фосген)	COCl ₂	—92,9	—77,0	—69,3	—60,3	—50,3	—44,0	—35,6	—22,3	—7,6	+8,3	—104	[34]
Кислород	O ₂	—219,1	—213,4	—210,6	—207,5	—204,1	—201,9	—198,8	—194,0	—188,8	—183,1	—218,7	[34]
Кобальт	Co	1471	—	1677	—	—	—	1940	—	—	2255	1490	[2]
Кобальта нитрозилтри- карбонил	Co(CO) ₃ NO	—	—	—	—1,3	+11,0	18,5	29,0	44,4	62,0	80,0	—11	[34]
Кобальт хлористый	CoCl ₂	—	—	—	—	770	801	843	904	974	1050	735	[34]
Кремний	Si	1665	—	1910	—	—	—	2239	—	—	2617	1415	[2]
Кремний четырехфто- ристый	SiF ₄	—144,0	—134,8	—130,4	—125,9	—120,8	—117,5	—113,3	—107,2	—100,7	—94,8	—90	[34]
Кремний четыреххло- ристый	SiCl ₄	—63,4	—44,1	—34,4	—24,0	—12,1	—4,8	+5,4	21,0	38,4	56,8	—68,8	[34]
Кремния окись	SiO ₂	—	—	1732	1798	1867	1911	1969	2053	2141	2227	1710	[34]
Криптон	Kr	—199,3	—191,3	—187,2	—182,9	—178,4	—175,7	—171,8	—165,6	—159,0	—152,0	—156,7	[34]
Ксенон	Xe	—168,5	—158,2	—152,8	—147,1	—141,2	—137,7	—132,8	—125,4	—117,1	—108,0	—111,6	[34]
Лантан	La	2156	—	2474	—	—	—	2887	—	—	3370	920	[2]
Литий	Li	723	828	881	940	1003	1042	1097	1178	1273	1372	186	[34]
Литий бромистый	LiBr	748	840	888	939	994	1028	1076	1147	1226	1310	547	[34]
» иодистый	LiI	723	802	841	883	927	955	993	1049	1110	1171	446	[34]
» фтористый	LiF	1047	1156	1211	1270	1333	1372	1425	1503	1591	1681	848,1	[34]
» хлористый	LiCl	783	880	932	987	1045	1081	1129	1203	1290	1382	614	[34]

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Темпера- тура плавления, °C	Литература
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760		
Лютеций	Lu	1453	—	1659	—	—	—	1938	—	—	2262	1727	[2]
Магний	Mg	621	702	743	789	838	868	909	967	1034	1107	651	[34]
Магний хлористый	MgCl ₂	778	877	930	988	1050	1088	1142	1223	1316	1418	712	[34]
Марганец	Mn	1292	1434	1505	1583	1666	1720	1792	1900	2029	2151	1260	[34]
Марганец хлористый	MnCl ₂	—	736	778	825	879	913	960	1028	1108	1190	650	[34]
Медь	Cu	1613	—	1910	—	—	—	2312	—	—	2877	1083	[2]
Медь бромистая (I)	Cu ₂ Br ₂	572	666	718	777	844	887	951	1052	1189	1355	504	[34]
» иодистая (I)	Cu ₂ I ₂	—	610	656	716	786	836	907	1018	1158	1336	605	[34]
» хлористая (I)	Cu ₂ Cl ₂	546	645	702	766	838	886	960	1077	1249	1490	422	[34]
Молибден	Mo	3102	3393	3535	3690	3859	3964	4100	4322	4553	4804	2622	[34]
Молибдена триоксид	MoO ₃	734	785	814	851	892	917	955	1014	1082	1151	795	[34]
Молибден шестифтористый	MoF ₆	—65,5	—49,0	—40,8	—32,0	—22,1	—16,2	—8,0	+4,1	17,2	36,0	17	[34]
Монобромдиборан	B ₂ BrH ₅	—93,3	—75,3	—66,3	—56,4	—45,4	—38,2	—29,0	—15,4	0,0	+16,3	—104,2	[34]
Мышьяк	As	372	416	437	459	483	498	518	548	579	610	814	[34]
Мышьяк триоксид	As ₂ O ₃	212,5	242,6	259,7	279,2	299,2	310,3	332,5	370,0	412,2	457,2	312,8	[34]
Мышьяк пентафтористый	AsF ₅	—117,9	—108,0	—103,1	—98,0	—92,4	—88,5	—84,3	—75,5	—64,0	—52,8	—79,8	[34]
» трибромистый	AsBr ₃	41,8	70,6	85,2	101,3	118,7	130,0	145,2	167,7	193,6	220	—	[34]
» трифтористый	AsF ₃	—	—	—	—	—2,5	+4,2	13,2	26,7	41,4	56,3	—5,9	[34]
» трихлористый	AsCl ₃	—11,4	+11,4	23,5	36,0	50,0	58,7	70,9	89,2	109,7	130,4	—18	[34]
Натрий	Na	433,8	511,6	552,8	587,5	631,1	659,5	696,8	753,2	816,5	882,9	97,83	[47, 48]
Натрий бромистый	NaBr	806	903	952	1005	1063	1099	1148	1220	1304	1392	755	[34]
» иодистый	NaI	767	857	903	952	1005	1039	1083	1150	1225	1304	651	[34]
» фтористый	NaF	1077	1186	1240	1300	1363	1403	1455	1531	1617	1704	992	[45]
» хлористый	NaCl	865	967	1017	1072	1131	1169	1220	1296	1379	1465	800	[34]
» цианистый	NaCN	817	928	983	1046	1115	1156	1214	1302	1401	1497	564	[34]
Натрия гидроксид	NaOH	739	843	897	953	1017	1057	1111	1192	1286	1378	319,1	[34, 46]
Неодим	Nd	1776	—	2091	—	—	—	2530	—	—	3111	1024	[2]
Неон	Ne	—257,3	—255,5	—254,6	—253,7	—252,6	—251,9	—251,0	—249,7	—248,1	—246,0	—248,7	[34]
Никель	Ni	1418	—	1602	—	—	—	2352	—	—	2142	1455	[2]
Никель хлористый	NiCl ₂	671	731	759	789	821	840	866	901	945	987	1001	[34]
Никеля карбонил	Ni(CO) ₄	—	—	—	—	—23,0	—15,9	—6,0	+8,8	25,8	42,5	—25	[34]
Ниобий	Nb	3293	—	3727	—	—	—	4237	—	—	4842	2497	[2]
Ниобий пентафтористый	NbF ₅	—	—	86,3	103,0	121,5	133,2	148,5	172,2	198,0	225,0	75,5	[34]
Нитрозил фтористый	NOF	—132,0	—120,3	—114,3	—107,8	—100,3	—95,7	—88,8	—79,2	—68,2	—56,0	—134	[34]
Нитрозил хлористый	NOCl	—	—	—	—	—60,2	—54,2	—46,3	—34,0	—20,3	—6,4	—64,5	[34]
Озон	O ₃	—180,4	—168,6	—163,2	—157,2	—150,7	—146,7	—141,0	—132,6	—122,5	—111,1	—251	[34]
Октахлортрисилан	Si ₃ Cl ₈	46,3	74,7	89,3	104,2	121,5	132,0	146,0	166,2	189,5	211,4	—	[34]
Олова гидрид	SnH ₄	—140,0	—125,8	—118,5	—111,2	—102,3	—96,6	—89,2	—78,0	—65,2	—52,3	—149,4	[34]
Олово	Sn	1613	—	1882	—	—	—	2245	—	—	2722	231,9	[2]
Олово бромное	SnBr ₄	—	58,3	72,7	88,1	105,5	116,2	131,0	152,8	177,7	204,7	31,0	[34]
» иодное	SnI ₄	—	156,0	175,8	196,2	218,8	234,2	254,2	283,5	315,5	348,0	144,5	[34]
» хлористое	SnCl ₂	316	366	391	420	450	467	493	533	577	623	246,8	[34]
» хлорное	SnCl ₄	—22,7	—1,0	+10,0	22,0	35,2	43,5	54,7	72,0	92,1	113,0	—30,2	[34]
Осмий	Os	3239	—	3627	—	—	—	4108	—	—	4607	2700	[2]

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Темпера- тура плавления, °C	Литера- тура
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760		
Осмия четырехокись:													
белая	OsO ₄	—5,6	+15,6	26,0	37,4	50,5	59,4	71,5	89,5	109,3	130,0	42	[34]
желтая	OsO ₄	3,2	22,0	31,3	41,0	51,7	59,4	71,5	89,5	109,3	130,0	56	[34]
Палладий	Pd	1973	—	2271	—	—	—	2658	—	—	3112	1550	[2]
Платина	Pt	2531	—	2857	—	—	—	3266	—	—	3707	1773	[2]
Плутоний шестифтористый	PuF ₆	—	—	—	1,3	11,1	16,8	24,2	35,0	46,8	62,16	51,59	[49]
Радий	Ra	785	—	961	—	—	—	1206	—	—	1536	700	[2]
Радон	Rn	—144,2	—132,4	—126,3	—119,2	—111,3	—106,2	—99,0	—87,7	—75,0	—61,8	—71	[34]
Рений	Re	3763	—	4249	—	—	—	4882	—	—	5642	3180	[2]
Ренния семиокись	Re ₂ O ₇	212,5	237,5	248,0	261,0	272,0	280,0	289,0	307,0	336,0	362,4	296	[34]
Родий	Rh	2521	—	2843	—	—	—	3270	—	—	3667	1966	[2]
Ртуть	Hg	125	—	202	—	—	—	254	—	—	357,0	—38,9	[2]
Ртуть бромистая (II)	HgBr ₂	136,5	165,3	179,8	194,3	211,5	221,0	237,8	262,7	290,0	319,0	237	[34]
» иодистая (II)	HgI ₂	157,5	189,2	204,5	220,0	238,2	249,0	261,8	291,0	324,2	354,0	259	[34]
» хлористая (II)	HgCl ₂	136,2	166,0	180,2	195,8	212,5	222,5	237,0	256,5	275,5	304,0	277	[34]
Рубидий	Rb	295	—	350	—	—	—	526	—	—	705	38,5	[2]
Рубидий бромистый	RbBr	781	876	923	975	1031	1066	1114	1186	1267	1352	682	[34]
» иодистый	RbI	748	839	884	935	991	1026	1072	1141	1223	1304	642	[34]
» фтористый	RbF	921	982	1016	1052	1096	1123	1168	1239	1322	1408	760	[45]
» хлористый	RbCl	792	887	937	990	1047	1084	1133	1207	1294	1381	715	[34]
Самарий	Sm	956	—	1117	—	—	—	1338	—	—	1601	1052	[2]
Свинец	Pb	973	1099	1162	1234	1309	1358	1421	1519	1630	1744	327,5	[34]
Свинец бромистый	PbBr ₂	513	578	610	646	686	711	745	796	856	914	373	[34]
» иодистый	PbI ₂	479	540	571	605	644	668	701	750	807	872	402	[34]
» сернистый	PbS	852	928	975	1005	1048	1074	1108	1160	1221	1281	1114	[34]
» фтористый	PbF ₂	—	861	904	950	1003	1036	1080	1144	1219	1293	855	[50]
» хлористый	PbCl ₂	547	615	648	684	725	750	784	833	893	954	501	[34]
Свинца окись	PbO	943	1039	1085	1134	1189	1222	1265	1330	1402	1472	890	[34]
Селен	Se	350	—	428	—	—	—	534	—	—	657	217	[2]
Селена двуокись	SeO ₂	157,0	187,7	202,5	217,5	234,1	244,6	258,0	277,0	297,7	317,0	340	[34]
» оксихлорид	SeOCl ₂	34,8	59,8	71,9	84,2	98,0	106,5	118,0	134,6	151,7	168,0	8,5	[34]
Селен четыреххлористый	SeCl ₄	74,0	96,3	107,4	118,1	130,1	137,8	147,5	161,0	176,4	191,5P	—	[34]
» шестифтористый	SeF ₆	—118,6	—105,2	—98,9	—92,3	—84,7	—80,0	—73,9	—64,8	—55,2	—45,8	—34,7	[34]
Сера	S	183,8	223,0	243,8	264,7	288,3	305,5	327,2	359,7	399,6	444,6	115,2	[34, 51]
Сера хлористая	S ₂ Cl ₂	—7,4	+15,7	27,5	40,0	54,1	63,2	75,3	93,5	115,4	138,0	—80	[34]
» шестифтористая	SF ₆	—132,7	—120,6	—114,7	—108,4	—101,5	—96,8	—90,9	—82,3	—72,6	—63,5	—50,2	[34]
Серебро	Ag	1330	—	1543	—	—	—	1825	—	—	2163	960,5	[2]
Серебро иодистое	AgI	820	927	983	1045	1111	1152	1210	1297	1400	1506	552	[34]
» хлористое	AgCl	912	1019	1074	1134	1200	1242	1297	1379	1467	1564	455	[34]
Серная кислота	H ₂ SO ₄	145,8	178,0	194,2	211,5	229,7	241,5	257,0	279,8	305,0	330,0P	10,5	[34]
Сернистый ангидрид	SO ₂	—95,5	—83,0	—76,8	—69,7	—60,5	—54,6	—46,9	—35,4	—23,0	—10,0	—73,2	[34]
Серный ангидрид (α)	SO ₃	—39,0	—23,7	—16,5	—9,1	—1,0	+4,0	10,5	20,5	32,6	44,8	16,9	[34]
» (β)	SO ₃	—34,0	—19,2	—12,3	—4,9	+3,2	8,0	14,3	23,7	32,6	44,8	32,3	[34]
» (γ)	SO ₃	—15,3	—2,0	+4,3	11,1	17,9	21,4	28,0	35,8	44,0	51,6	62,1	[34]
Сероводород	H ₂ S	—134,3	—122,4	—116,3	—109,7	—102,3	—97,9	—91,6	—82,3	—71,8	—60,4	—85,5	[34]

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления °С	Литература
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760		
Силан	SiH ₄	-179,3	-168,6	-163,0	-156,9	-150,3	-146,3	-140,5	-131,6	-122,0	-111,5	-185	[34]
Синильная кислота	HCN	-71,0	-55,3	-47,7	-39,7	-30,9	-25,1	-17,8	-5,3	+10,2	25,9	-13,2	[34]
Скандий	Sc	1547	—	1777	—	—	—	2097	—	—	2427	1400	[2]
Стронций	Sr	737	—	877	—	—	—	1097	—	—	1357	770	[2]
Стронция окись	SrO	2068	2198	2262	2333	2410	—	—	—	—	—	2430	[34]
Сульфурил хлористый	SO ₂ Cl ₂	—	-35,1	-24,8	-13,4	-1,0	+7,2	17,8	33,7	51,3	69,2	-54,1	[34]
Сурьма	Sb	731	—	960	—	—	—	1289	—	—	1625	630,5	[2]
Сурьма пятифтористая	SbF ₅	2,7	27,3	39,2	52,2	66,2	75,0	86,8	104,1	123,1	142,5	8,3	[52]
» пятихлористая	SbCl ₅	22,7	48,6	61,8	75,8	91,0	101,0	114,1	—	—	—	2,8	[34]
» трехбромистая	SbBr ₃	93,9	126,0	142,7	158,3	177,4	188,1	203,5	225,7	250,2	275,0	96,6	[34]
» трехиодистая	SbI ₃	163,6	203,8	223,5	244,8	267,8	282,5	303,5	333,8	368,5	401,0	167	[34]
» треххлористая	SbCl ₃	49,2	71,4	85,2	100,6	117,8	128,3	143,3	165,9	192,2	219,0	73,4	[34]
Сурьмы трехокись	Sb ₂ O ₃	574	626	666	729	812	873	957	1085	1242	1425	656	[34]
Таллий	Tl	825	931	983	1040	1103	1143	1196	1274	1364	1457	303,5	[34]
Таллий бромистый	TlBr	—	490	522	559	598	621	653	703	759	819	460	[34]
» иодистый	TlI	440	502	531	567	607	631	663	712	763	823	440	[34]
» пятифтористый	TlF ₅	59,3	89,0	103,5	119,2	136,2	146,9	161,2	182,2	205,4	229,0	—	[53]
» хлористый	TlCl	—	487	517	550	589	612	645	694	748	807	430	[34]
Таитал	Ta	3705	—	4135	—	—	—	4677	—	—	5292	2997	[2]
Тантал пятифтористый	TaF ₅	—	—	—	—	—	110,3	130,0	159,9	194,0	230,0	96,8	[34]
Теллур	Te	517	—	632	—	—	—	792	—	—	1012	450	[2]
Теллур четыреххлористый	TeCl ₄	—	—	233	253	273	287	304	330	360	392	224	[34]
» шестифтористый	TeF ₆	-111,3	-98,8	-92,4	-86,0	-78,4	-73,8	-67,9	-57,3	-48,2	-38,6	-37,8	[34]
Тетраборан	B ₄ H ₁₀	-90,9	-73,1	-64,3	-54,8	-44,3	-37,4	-28,1	-14,0	+0,8	16,1	-119,9	[34]
Тетрагидроэнтаборан	B ₅ H ₁₁	-50,2	-29,9	-19,9	-9,2	+2,7	10,2	20,1	34,8	51,2	67,0	—	[34]
Тетраметилгерманий	Ge(CH ₃) ₄	-73,2	-54,6	-45,2	-35,0	-23,4	-16,2	-6,3	+8,8	26,0	44,0	-88	[34]
Тетрасилан	Si ₄ H ₁₀	-27,7	-6,2	+4,3	15,8	28,4	36,6	47,4	63,6	81,7	100,0	-93,6	[34]
Тионилбромид	SOBr ₂	-6,7	+18,4	31,0	44,1	58,8	68,3	80,6	99,0	119,2	139,5	-52,2	[34]
Тионилхлорид	SOCl ₂	-52,9	-32,4	-21,9	-10,5	+2,2	10,4	21,4	37,9	56,5	75,4	-104,5	[34]
Титан	Ti	2191	—	2490	—	—	—	2833	—	—	3169	1707	[2]
Титан четыреххлористый	TiCl ₄	-13,9	+9,4	21,3	34,2	48,4	58,0	71,0	90,5	112,7	136,0	-30	[34]
Трибромсилан	SiHBr ₃	-30,5	-8,0	+3,4	16,0	30,0	39,2	51,6	70,2	90,2	111,8	-73,5	[34]
Трибромфторсилан	SiBr ₃ F	-46,1	-25,4	-15,1	-3,7	+9,2	17,4	28,6	45,7	64,6	83,8	-82,5	[34]
Тригерман	Ge ₃ H ₈	-36,9	-12,8	-0,9	+11,8	26,3	35,5	47,9	67,0	88,6	110,8	-105,6	[34]
Трисилан	Si ₃ H ₈	-68,9	-49,7	-40,0	-29,0	-16,9	-9,0	+1,6	17,8	35,5	53,1	-117,2	[34]
Трифторсилан	SiF ₃	-152,0	-142,7	-138,2	-132,9	-127,3	-123,7	-118,7	-111,3	-102,8	-95,0	-131,4	[34]
Трихлоргерман	GeHCl ₃	-41,3	-22,3	-13,0	-3,0	+8,8	16,2	26,5	41,6	58,3	—	-71,1	[34]
Трихлорсилан	SiHCl ₃	-80,7	-62,6	-53,4	-43,8	-32,9	-25,8	-16,4	-1,8	+14,5	31,8	-126,6	[34]
Углерода двуокись	CO ₂	-134,3	-124,4	-119,5	-114,4	-108,6	-104,8	-100,2	-93,0	-85,7	-78,2	-57,5	[34]
» окись	CO	-222,0	-217,2	-215,0	-212,8	-210,0	-208,1	-205,7	-201,3	-196,3	-191,3	-205,0	[34]
Уран	U	2456	—	2824	—	—	—	3306	—	—	3862	1133	[2]
Уран шестифтористый	UF ₆	-30,3	-14,3	-7,6	+1,7	10,6	16,0	23,4	34,0	45,3	54,6	64,02	[17, 29]
Фосфин	PH ₃	—	—	—	—	-129,4	-125,0	-118,8	-109,4	-98,3	-87,5	-132,5	[34]
Фосфоний бромистый	PH ₄ Br	-43,7	-28,5	-21,2	-13,3	-5,0	+0,3	7,4	17,6	28,0	38,3P	—	[34]
» иодистый	PH ₄ I	-25,2	-9,0	-1,1	+7,3	16,1	21,9	29,3	39,9	51,6	62,3	—	[34]

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C	Литература
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760		
Фосфорный хлористый	PH_4Cl	-91,0	-79,6	-74,0	-68,0	-61,5	-57,3	-52,0	-44,0	-35,4	-27,0	-28,5	[34]
Фосфор желтый	P	76,6	111,2	128,0	146,2	166,7	179,8	197,3	222,7	251,0	280,0	44,1	[34]
» фиолетовый	P	237	271	287	306	323	334	349	370	391	417	590	[34]
» черный	P	290	323	338	354	371	381	393	413	432	453	—	[34]
Фосфора оксихлорид	POCl_3	—	—	2,0	13,6	27,3	35,8	47,4	65,0	84,3	105,1	2	[34]
» пятиокись (метастабильная форма)	P_2O_5	189	220	236	253	270	280	294	314	336	358	—	[34]
Фосфора пятиокись (стабильная форма)	P_2O_5	384	424	442	462	481	493	510	532	556	591	569	[34]
» тиобромид	PSBr_3	50,0	72,4	83,6	95,5	108,0	116,0	126,3	141,8	157,8	175,0P	38	[34]
» тиохлорид	PSCl_3	-18,3	+4,6	16,1	29,0	42,7	51,8	63,8	82,0	102,3	124,0	-36,2	[34]
» трехокись	P_2O_3	—	39,7	53,0	67,8	84,0	94,2	108,3	129,0	150,3	173,1	22,5	[34]
Фосфор пятихлористый	PCl_5	55,5	74,0	83,2	92,5	102,5	108,3	117,0	131,3	147,2	162,0	—	[34]
» трехбромистый	PBr_3	7,8	34,4	47,8	62,4	79,0	89,8	103,6	125,2	149,7	175,3	-40	[34]
» треххлористый	PCl_3	-51,6	-31,5	-21,3	-10,2	+2,3	10,2	21,0	37,6	56,9	74,2	-111,8	[34]
Франций	Fr	224	—	310	—	—	—	435	—	—	606	27	[2]
Фтор	F_2	-223,0	-216,9	-214,1	-211,0	-207,7	-205,6	-202,7	-198,3	-193,2	-188,2	-219,7	[55]
Фтора окись	F_2O	-196,1	-186,6	-182,3	-177,8	-170,0	-165,8	-159,0	-151,9	-145,3	-138,9	-223,9	[56, 57]
Фторсилан	SiH_3F	-153,0	-145,5	-141,2	-136,3	-130,8	-127,2	-122,4	-115,2	-106,8	-98,0	—	[34]
Фтортрихлорсилан	SiCl_3F	-92,6	-76,4	-68,3	-59,0	48,8	-42,2	-33,2	-19,3	-4,0	+12,2	-120,8	[34]
Хлор	Cl_2	-118,0	-106,7	-101,6	-93,3	-84,5	-79,0	-71,7	-60,2	-47,3	-33,8	-100,7	[34]
Хлора двуокись	ClO_2	—	—	-59,0	-51,2	-42,8	-37,2	-29,4	-17,8	-4,0	+11,1	-59	[34]
» окись	Cl_2O	-98,5	-81,6	-73,1	-64,3	-54,3	-48,0	-39,4	-26,5	-12,5	+2,2	-116	[34]
» шестиокись	Cl_2O_6	7,5	30,5	42,0	54,3	68,0	76,3	87,7	104,7	123,8	142,0	3,5	[34]
Хлорный ангидрид	Cl_2O_7	-45,3	-23,8	-13,2	-2,1	+10,3	18,2	29,1	44,6	62,2	78,8	-91	[34]
Хлорсилан	SiH_3Cl	-117,8	-104,3	-97,7	-90,1	-81,8	-76,0	-68,5	-57,0	-44,5	-30,4	—	[34]
Хлорсульфоновая кислота	HSO_3Cl	32,0	53,5	64,0	75,3	87,6	95,2	105,3	120,0	136,1	151,0P	-80	[34]
Хлортрифторсилан	SiClF_3	-144,0	-133,0	-127,0	-120,5	-112,8	-108,2	-101,7	-91,7	-81,0	-70,0	-142	[34]
Хлор трехфтористый	ClF_3	—	-80,4	-71,8	-62,3	-51,3	-44,1	-34,7	-20,7	-4,9	+11,5	-83	[34]
» фтористый	ClF	—	-143,4	-139	-134,3	-128,8	-125,3	-120,8	-114,4	-107,0	-100,5	-145	[34]
Хром	Cr	1695	—	1922	—	—	—	2221	—	—	2567	1903	[2]
Хрома карбонил	$\text{Cr}(\text{CO})_6$	36,0	58,0	68,3	79,5	91,2	98,3	108,0	121,8	137,2	151,0	—	[34]
Хромил хлористый	CrO_2Cl_2	-18,4	+3,2	13,8	25,7	38,5	46,7	58,0	75,2	95,2	117,1	—	[34]
Цезий	Cs	279	341	375	409	449	474	509	561	624	690	28,5	[34]
Цезий бромистый	CsBr	748	838	887	938	993	1026	1072	1140	1221	1300	636	[34]
» иодистый	CsI	738	828	873	923	976	1009	1055	1124	1200	1280	621	[34]
» фтористый	CsF	712	798	844	893	947	980	1025	1092	1170	1251	683	[34]
» хлористый	CsCl	744	837	884	934	989	1023	1069	1139	1217	1300	646	[34]
Цинк	Zn	487	558	593	632	673	700	736	788	844	907	419,4	[34]
Цинк фтористый	ZnF_2	1243	1328	1359	1402	1448	1480	1527	1602	1690	1770	872	[36]
» хлористый	ZnCl_2	428	481	508	536	566	584	610	648	689	732	365	[34]
Цирконий четырехбромистый	ZrBr_4	207	237	250	266	281	289	301	318	337	357	450	[34]
» четырехиодистый	ZrI_4	264	297	311	329	344	355	369	389	409	431	499	[34]
» четыреххлористый	ZrCl_4	185,7	214,7	228,4	242,8	258,1	267,5	279,7	297,3	316,1	334,6	437	[41]

Температуры, °С, при которых устанавливается указанное давление паров неорганических веществ (выше 1 атм)

Вещество	Формула	Давление пара, атм									Критическая температура, °С	Критическое давление, атм	Литература
		1	2	5	10	20	30	40	50	60			
Азот	N ₂	-195,8	-189,2	-179,1	-169,8	-157,6	-148,3	—	—	—	-147,2	33,5	[34]
Азота закись	NO ₂	-88,5	-76,8	-58,0	-40,7	-18,8	-4,3	+8,0	18,0	27,4	36,5	71,7	[34]
» окись	NO	-151,7	-145,1	-135,7	-127,3	-116,8	-109,0	-103,2	-99,0	-94,8	-92,9	64,6	[34]
» четырехокись	N ₂ O ₄	21,0	37,3	59,8	79,4	100,3	112,3	121,4	127,0	132,2	158	99	[34]
Азот трехфтористый	NF ₃	-129,0	—	—	—	—	—	—	—	—	-39,3±0,1	44,7±0,2	[35]
Аммиак	NH ₃	-33,6	-18,7	+4,7	25,7	50,1	66,1	78,9	89,3	98,3	132,4	111,5	[34]
Аргон	Ar	-185,6	-179,0	-166,7	-154,9	-141,3	-132	-124,9	—	—	-122,0	48,0	[34]
Бор трехфтористый	BF ₃	-100,7	-89,4	-72,6	-57,7	-40,0	-28,4	-19,0	—	—	-12,2	49,2	[34]
» треххлористый	BCl ₃	12,7	33,2	96,7	135,4	161,5	—	—	—	—	178,8	38,2	[34]
Бром	Br ₂	58,2	78,8	110,3	139,8	174,0	197,0	216,0	230,0	243,5	302,2	121	[34]
Вода	H ₂ O	99,09*	119,62*	151,11*	179,04*	211,38*	232,76*	249,18*	262,70*	274,29*	374,15	225,65	[1]
Водород	H ₂	-252,5	-250,2	-246,0	-241,6	—	—	—	—	—	-240,0	12,8	[34]
Водород бромистый	HBr	-66,5	-51,5	-29,1	-8,4	+16,8	33,9	48,1	60,0	70,6	90,0	84,4	[34]
» иодистый	HI	-35,1	-18,9	+7,3	32,0	62,2	83,2	100,7	116,2	127,5	151,0	82,0	[34]
» селенистый	H ₂ Se	-41,1	-25,2	0,0	+23,4	50,8	69,7	84,6	97,2	108,7	137	91,0	[34]
» фтористый	HF	19,43	37,1	70,4	97,9	130,9	—	—	—	—	—	—	[40]
» хлористый	HCl	-84,8	-71,4	-50,5	-31,7	-8,8	+5,9	17,8	27,9	36,2	51,4	81,6	[34]
Вольфрам шестифтористый	WF ₆	17,0	36,4	67,7	97,0	131,5	155,6	172,0	—	—	179,5	45,0	[15]
Гелий	He	-268,6	-268,0	—	—	—	—	—	—	—	-267,9	2,26	[34]
Дихлордифторсилан	SiCl ₂ F ₂	-31,8	-15,1	+11,6	36,6	66,2	86,0	—	—	—	95,8	34,5	[34]
Кислород	O ₂	-183,1	-176,0	-164,5	-153,2	-140,0	-130,7	-124,1	—	—	-118,9	49,7	[34]
Кремний четырехфтористый	SiF ₄	-94,8	-84,4	-67,9	-52,6	-33,4	-21,2	—	—	—	-14,2	36,7	[34]
Криптон	Kr	-152,0	-143,5	-130,0	-118,0	-101,7	-88,8	-78,4	-66,5	—	-63	54	[34]
Молибден шестифтористый	MoF ₆	35,0	54,9	88,0	118,3	154,4	178,9	197,5	—	—	211,4	48,7	[16]
Неон	Ne	-246,0	-243,5	-239,9	-236,0	-230,8	—	—	—	—	-228,3	26,9	[34]
Олово хлорное	SnCl ₂	113,0	141,3	184,3	223,0	270,0	299,8	—	—	—	318,7	37,9	[34]
Перхлорилфторид	FClO ₃	-46,4	-30,4	-4,7	+18,3	46,0	64,9	79,7	92,3	—	95,17	53,0	[58]
Плутоний шестифтористый	PuF ₆	62,16	(85,1)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[49]
Сера шестифтористая	SF ₆	-68,2	-53,1	-29,4	-7,8	+18,1	35,7	—	—	—	45,5	37,1	[59]
Сернистый ангидрид	SO ₂	-10,0	+6,3	32,1	55,5	83,8	102,6	118,0	130,2	141,7	157,2	77,7	[34]
Серный ангидрид	SO ₃	44,8	60,0	82,5	104,0	138,0	157,8	175,0	187,8	198,0	218,3	83,6	[34]
Сероводород	H ₂ S	-60,4	-45,9	-22,3	-0,4	+25,5	41,9	55,8	66,7	76,3	100,3	88,9	[34]
Синильная кислота	HCN	25,9	45,9	75,8	102,7	135,0	153,8	169,9	183,5	—	183,5	50,0	[34]
Углерода двуокись	CO ₂	-78,2	-69,1	-56,7	-39,5	-18,9	-5,3	+5,9	14,9	22,4	31,1	73,0	[34]
» окись	CO	-191,3	-183,5	-170,7	-161,0	-149,7	-141,9	—	—	—	-138,7	34,6	[34]
Уран шестифтористый	UF ₆	56,5	—	112,7	139,3	177,3	202,9	222,4	—	—	230,1	45,3	[17]
Фтортрихлорсилан	SiCl ₃ F	12,2	32,4	64,6	94,2	131,8	156,0	—	—	—	165,3	35,3	[34]
Хлор	Cl ₂	-33,8	-16,9	+10,3	35,6	65,0	84,8	101,6	115,2	127,1	144,0	76,1	[34]
Хлортрифторсилан	SiClF ₃	-70,0	-57,3	-37,2	-18,6	+4,1	19,4	—	—	—	34,8	34,2	[34]

* При давлении в кг/см².

12.4. ОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА

Температуры, °С, при которых устанавливается указанное давление паров органических веществ (ниже 1 атм)* [34]

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Адипиновая кислота	$C_6H_{10}O_4$	159,5	191,0	205,5	222,0	240,5	251,0	265,0	287,8	312,5	337,5	152,0
Азелаиновая кислота	$C_9H_{16}O_4$	178,3	210,4	225,5	242,4	260,0	271,8	286,5	309,6	332,8	356,5P	106,5
Азелаиновый альдегид	$C_9H_{18}O$	33,3	58,4	71,6	85,0	100,2	110,2	123,0	142,1	163,4	185,0	—
Азобензол	$C_{12}H_{10}N_2$	103,5	135,7	151,5	168,3	187,9	199,8	216,0	240,0	266,1	293,0	68,0
Акридин	$C_{13}H_9N$	129,4	165,8	184,0	203,5	224,2	238,7	256,0	284,0	314,3	346,0	110,5
Акриловая кислота	$C_3H_4O_2$	3,5	27,3	39,0	52,0	66,2	75,0	86,1	103,3	122,0	141,0	14,0
Акрилонитрил	$C_3H_3.5N$	—51,0	—30,7	—20,3	—9,0	+3,8	11,8	22,8	38,7	58,3	78,5	—82,0
Акролеин	C_3H_4O	—64,5	—46,0	—36,7	—26,3	—15,0	—7,5	+2,5	17,5	34,5	52,5	—87,7
Алантактон	$C_{15}H_{20}O_2$	157,7	181,3	192,1	203,5	215,2	222,5	232,6	247,1	260,6	275,0	76,0
Аллен	C_3H_4	—120,6	—108,0	—101,0	—93,4	—85,2	—78,8	—72,5	—61,3	—48,5	—35,0	—136
4-Аллилвератрол	$C_{11}H_{14}O_2$	85,0	113,9	127,0	142,8	158,3	169,6	183,7	204,0	226,2	248,0	—
5-Аллилгваякол	$C_{10}H_{12}O_2$	83,6	113,3	127,0	143,2	159,8	170,7	185,5	206,8	229,8	254,0	—
Аллилдихлорэтилсилан	$C_6H_{10}Cl_2Si$	—3,0	+22,0	34,2	47,6	62,7	72,3	85,2	104,8	127,0	150,3	—
Аллилизопропиловый эфир	$C_8H_{12}O$	—43,7	—23,1	—12,9	—1,8	+10,9	18,7	29,0	44,3	61,7	79,5	—
Аллилизотиоцианат	C_4H_5NS	—2,0	+25,3	38,3	52,1	67,4	76,2	89,5	108,0	129,8	150,7	— 80,0
Аллиловый спирт	$C_8H_{16}O$	—20,0	+0,2	10,5	21,7	33,4	40,3	50,0	64,5	80,2	96,6	—129
Аллилпропиловый эфир	$C_9H_{12}O$	—39,0	—18,2	—7,9	+3,7	16,4	25,0	35,8	52,6	71,4	90,5	—
Аллилтрихлорсилан [60]	$C_3H_5Cl_3Si$	—20,7	+2,0	16,1	27,5	40,1	48,3	59,4	76,4	95,9	116,8	—
втор-Амилбензол	$C_{11}H_{16}$	27,8	53,0	65,8	79,5	94,1	103,9	116,7	135,8	156,2	178,0	—
Амелизопропионат	$C_8H_{16}O_2$	8,5	33,7	46,3	60,0	75,5	85,2	97,6	117,3	138,4	160,2	—
Амиллевулиат	$C_{10}H_{18}O_3$	81,3	110,0	124,0	139,7	155,8	165,2	180,5	203,1	227,4	253,2	—
Амиловый спирт	$C_8H_{12}O$	13,6	34,7	44,9	55,8	68,0	75,5	85,8	102,0	119,8	137,8	—
трет-Амиловый спирт	$C_8H_{12}O$	—12,9	+7,2	17,2	27,9	38,8	46,0	55,3	69,7	85,7	101,7	—11,9
Амилтриметилсилан	$C_8H_{20}Si$	—9,2	+14,7	26,7	39,8	54,4	63,8	76,2	95,0	116,6	139,0	—
Амилтриэтилсилан	$C_{11}H_{26}Si$	41,8	69,9	83,8	99,2	116,0	126,6	141,2	162,0	186,3	211,0	—
n-трет-Амилфенол	$C_{11}H_{16}O$	—	109,8	125,5	142,3	160,3	172,6	189,0	213,0	239,5	266,0	93,0
Анетол	$C_{10}H_{12}O$	62,6	91,6	106,0	121,8	139,3	149,8	164,2	186,1	210,5	235,3	22,5
Анизол	C_7H_8O	5,4	30,0	42,2	55,8	70,7	80,1	93,0	112,3	133,8	155,5	—37,3
Анилин	C_6H_5N	34,8	57,9	69,4	82,0	96,7	106,0	119,9	140,1	161,9	184,4	— 6,2
2-Анилинэтанол	$C_8H_{11}NO$	104,0	134,3	149,6	165,7	183,7	194,0	209,5	230,6	254,5	279,6	—
Анисовый альдегид	$C_8H_8O_2$	73,2	102,6	117,8	133,5	150,5	161,7	176,7	199,0	223,0	248,0	2,5
Антрахинон	$C_{14}H_{10}O_2$	190,0	219,4	234,2	248,3	264,3	273,3	285,0	314,6	346,2	379,9	286,0
Антрацен	$C_{14}H_{10}$	145,0	173,5	187,2	201,9	217,5	231,8	250,0	279,0	310,2	342,0	217,5
Апиол	$C_{12}H_{14}O_4$	116,0	145,9	160,2	176,2	193,7	204,3	218,0	239,8	262,1	285,0	30,0
Аценафтен	$C_{12}H_{10}$	—	114,8	131,2	148,7	168,2	181,2	197,5	222,1	250,0	277,5	95,0
Ацетальдегид	C_2H_4O	—81,5	—65,1	—56,8	—47,8	—37,8	—31,4	—22,6	—10,0	+4,9	20,2	—123,5
Ацетальдоксим	C_2H_5NO	—5,8	+15,2	25,8	36,5	48,6	56,1	66,2	81,7	98,0	115,0	47,0
Ацетамид	C_2H_5NO	65,0	92,0	105,0	120,0	135,8	145,8	158,0	178,3	200,0	222,0	81,0
Ацетанилид	C_8H_9NO	114,0	146,6	162,0	180,0	199,6	211,8	227,2	250,5	277,0	303,8	113,5
Ацетилен	C_2H_2	—142,9	—133,0	—128,2	—122,8	—116,7	—112,8	—107,9	—100,3	—92,0	—84,0	—81,5
Ацетон	C_3H_6O	—59,4	—40,5	—31,1	—20,8	—9,4	—2,0	+7,7	22,7	39,5	56,5	—94,6
1-Ацетонафтон	$C_{12}H_{10}O$	115,6	146,3	161,5	178,4	196,8	208,6	223,8	246,7	270,5	295,5	—
2-Ацетонафтон	$C_{12}H_{10}O$	120,2	152,3	168,5	185,7	203,8	214,7	229,8	251,6	275,8	301,0	55,5

* Буквой Р отмечена температура разложения, П—температура полимеризации.

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Ацетонитрил	C_2H_3N	-47,0	-26,6	-16,3	-5,0	+7,7	15,9	27,0	43,7	62,5	81,8	-41,0
Ацетофенон	C_8H_8O	37,1	64,0	78,0	92,4	109,4	119,8	133,6	154,2	178,0	202,4	20,5
Бензальдегид	C_7H_6O	26,2	50,1	62,0	75,0	90,1	99,6	112,5	131,7	154,1	179,0	-26,0
Бензантрон	$C_{17}H_{10}O$	225,0	274,5	297,2	322,5	350,0	368,8	390,0	426,5P	—	—	174,0
Бензгидрол	$C_{13}H_{12}O$	110,0	145,0	162,0	180,9	200,0	212,0	227,5	250,0	275,6	301,0	68,5
Бензил	$C_{14}H_{10}O_2$	128,4	165,2	183,0	202,8	224,5	238,2	255,8	283,5	314,3	347,0	95,0
Бензиламин	C_7H_9N	29,0	54,8	67,7	81,8	97,3	107,3	120,0	140,0	161,3	184,5	—
Бензилацетат	$C_9H_{10}O_2$	45,0	73,4	87,6	102,3	119,6	129,8	144,0	165,5	189,0	213,5	-51,5
Бензидихлорсилан	$C_7H_8Cl_2Si$	45,3	70,2	83,2	96,7	111,8	121,3	133,5	152,0	173,0	194,3	—
Бензилизотиоцианат	C_8H_7NS	79,5	107,8	121,8	137,0	153,0	163,8	177,7	198,0	220,4	243,0	—
Бензиловый спирт	C_7H_8O	58,0	80,8	92,6	105,8	119,8	129,3	141,7	160,0	183,0	204,7	-15,3
Бензилфениловый эфир	$C_{13}H_{12}O$	95,4	127,7	144,0	160,7	180,1	192,6	209,2	233,2	259,8	287,0	—
Бензилциннамат	$C_{16}H_{14}O_2$	173,8	206,3	221,5	239,3	255,8	267,0	281,5	303,8	326,7	350,0	39,0
Бензилэтиловый эфир	$C_9H_{10}O$	26,0	52,0	65,0	79,6	95,4	105,5	118,9	139,6	161,5	185,0	—
Бензоил хлористый	C_7H_5ClO	32,1	59,1	73,0	87,6	103,8	114,7	128,0	149,5	172,8	197,2	-0,5
Бензонин	$C_{14}H_{12}O_2$	135,6	170,2	188,0	207,0	227,6	241,7	258,0	284,4	313,5	343,0	132,0
Бензойная кислота	$C_7H_6O_2$	96,0	119,5	132,1	146,7	162,6	172,8	186,2	205,8	227,0	249,2	121,7
Бензойный ангидрид	$C_{14}H_{10}O_3$	143,8	180,0	198,0	218,0	239,8	252,7	270,4	299,1	328,8	360,0	42,0
Бензол	C_6H_6	-36,7	-19,6	-11,5	-2,6	+7,6	15,4	26,1	42,2	60,6	80,1	5,5
Бензолсульфонилхлорид	$C_6H_5ClO_2S$	65,9	96,5	112,0	129,0	147,7	158,2	174,5	198,0	224,0	251,5P	14,5
Бензоинитрил	C_7H_5N	44,5	71,7	85,5	100,2	116,6	127,0	141,0	161,3	185,0	208,0	-13
Бензофенон	$C_{13}H_{10}O$	108,2	141,7	157,6	175,8	195,7	208,2	224,4	249,8	276,8	305,4	48,5
Бистрихлорсилэтан [60]	$C_2H_4Cl_2Si_2$	—	—	77,7	92,9	109,6	120,1	134,2	155,2	178,6	202,9	—
Боринкарбонил	CH_3BO	-139,2	-127,3	-121,1	-114,1	-106,6	-101,9	-95,3	-85,5	-74,8	-64,0	—
d-Борнилацетат	$C_{12}H_{20}O_2$	46,9	75,7	90,2	106,0	123,7	135,7	149,8	172,0	197,5	223,0	29,0
Борнилбутират	$C_{14}H_{24}O_2$	74,0	103,4	118,0	133,8	150,7	161,8	176,4	198,0	222,2	247,0	—
Борнилизобутират	$C_{14}H_{24}O_2$	70,0	99,8	114,0	130,0	147,2	157,6	172,2	194,2	218,2	243,0	—
Борнилпропионат	$C_{13}H_{22}O_2$	64,6	93,7	108,0	123,7	140,4	151,2	165,7	187,5	211,2	235,0	—
Борнилформиат	$C_{11}H_{18}O_2$	47,0	74,8	89,3	104,0	121,2	131,7	145,8	166,4	190,2	214,0	—
Брассидиновая кислота	$C_{22}H_{42}O_2$	209,6	241,7	256,0	272,9	290,0	301,5	316,2	336,8	359,6	382,5P	61,5
4-Броманизол	C_6H_4BrO	48,8	77,8	91,9	107,8	125,0	136,0	150,1	172,7	197,5	223,0	12,5
Бромбензол	C_6H_5Br	2,9	27,8	40,0	53,8	68,6	78,1	90,8	110,1	132,3	156,2	-30,7
1-Бромбутан	C_4H_9Br	-33,0	-11,2	-0,3	+11,6	24,8	33,4	44,7	62,0	81,7	101,6	-112,4
1-Бром-2-бутанол	C_4H_9BrO	23,7	45,4	55,8	67,2	79,5	87,0	97,6	112,1	128,3	145,0	—
1-Бром-2-бутанон	C_4H_7BrO	6,2	30,0	41,8	54,2	68,2	77,3	89,2	107,0	126,3	147,0	—
цис-1-Бром-1-бутен	C_4H_7Br	-44,0	-23,2	-12,8	-1,4	+11,5	19,8	30,8	47,8	66,8	86,2	—
транс-1-Бром-1-бутен	C_4H_7Br	-38,4	-17,0	-6,4	+5,4	18,4	27,2	38,1	55,7	75,0	94,7	-100,3
2-Бром-2-бутен	C_4H_7Br	-47,3	-27,0	-16,8	-5,3	+7,2	15,4	26,3	42,8	61,9	81,0	-133,4
цис-2-Бром-2-бутен	C_4H_7Br	-39,0	-17,9	-7,2	+4,6	17,7	26,2	37,5	54,5	74,0	93,9	-111,2
транс-2-Бром-2-бутен	C_4H_7Br	-45,0	-24,1	-13,8	-2,4	+10,5	18,7	29,9	46,5	66,0	85,5	-114,6
4-Бромдифенил	$C_{12}H_8Br$	98,0	133,7	150,0	169,8	190,8	204,5	221,8	248,2	277,7	310,0	90,5
2-Бром-4,6-дихлорфенол	$C_6H_3BrCl_2O$	84,0	115,6	130,8	147,7	165,8	177,6	193,2	216,5	242,0	268,0	68,0
Бромистый бензоил	C_7H_5BrO	47,0	75,4	89,8	105,4	122,6	133,4	147,7	169,2	193,7	218,5	0,0
2-Бром-1,4-ксилол	C_8H_8Br	37,5	65,0	78,8	94,0	110,6	121,6	135,7	156,4	181,0	206,7	9,5
1-Бром-3-метилбутан	$C_5H_{11}Br$	-20,4	+2,1	13,6	26,1	39,8	48,7	60,4	78,7	99,4	120,4	—
1-Бромнафталин	$C_{10}H_7Br$	84,2	117,5	133,6	150,2	170,2	183,5	198,8	224,2	252,0	281,1	5,5
2-Бром-2-нитропропан	C_3H_6BrNO	-33,5	-14,0	-4,3	+6,0	17,9	25,5	35,2	50,0	66,2	83,0	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
3-Бромпиридин	C_5H_4BrN	16,8	42,0	55,2	69,1	84,1	94,1	107,8	127,7	150,0	173,4	—
1-Бромпропан	C_3H_7Br	—53,0	—33,4	—23,3	—12,4	—0,3	+7,5	18,0	34,0	52,0	71,0	—109,9
2-Бромпропан	C_3H_7Br	—61,8	—42,5	—32,8	—22,0	—10,1	—2,5	+8,0	23,8	41,5	60,0	—89,0
α -Бромтолуол	C_7H_7Br	32,2	59,6	73,4	88,3	104,8	115,6	129,8	150,8	175,2	198,5	—4,0
2-Бромтолуол	C_7H_7Br	24,4	49,7	62,3	76,0	91,0	100,0	112,0	133,6	157,3	181,8	—28,0
3-Бромтолуол	C_7H_7Br	14,8	50,8	64,0	78,1	93,9	104,1	117,8	138,0	160,0	183,7	—39,8
4-Бромтолуол	C_7H_7Br	10,3	47,5	61,1	75,2	91,8	102,3	116,4	137,4	160,2	184,5	—28,5
3-Бром-2,4,6-трихлорфенол	$C_6H_2BrCl_3O$	112,4	146,2	163,2	181,8	200,5	213,0	229,3	253,0	278,0	305,8	—
Бромуксусная кислота	$C_2H_3BrO_2$	54,7	81,6	94,1	108,2	124,0	133,8	146,3	165,8	186,7	208,0	49,5
2-Бром-4-фенилфенол	$C_{12}H_9BrO$	100,0	135,4	152,3	171,8	193,8	207,0	224,5	251,0	280,2	311,0	95,0
1,4-Бромхлорбензол	C_6H_4BrCl	32,0	59,5	72,7	87,8	103,8	114,8	128,0	149,5	172,6	196,9	—
1-Бром-1-хлорэтан	C_2H_4BrCl	—36,0	—18,0	—9,4	0,0	+10,4	17,0	28,0	44,7	63,4	82,7	16,6
1-Бром-2-хлорэтан	C_2H_4BrCl	—28,8	—7,0	+4,1	16,0	29,7	38,0	49,5	66,8	86,0	106,7	—16,6
1-Бром-4-этилбензол	C_8H_9Br	30,4	42,5	74,0	90,2	108,5	121,0	135,5	156,5	182,0	206,0	—45,0
(2-Бромэтил)-бензол	C_8H_9Br	48,0	76,2	90,5	105,8	123,2	133,8	148,2	169,8	194,0	219,0	—
1-Бромэтилен	C_2H_3Br	—95,4	—77,8	—68,8	—58,8	—48,1	—41,2	—31,9	—17,2	—1,1	+15,8	—138,0
2-Бромэтиловый-2-хлорэтиловый эфир	C_4H_8BrClO	36,5	63,2	76,3	90,8	106,6	116,4	129,8	150,0	172,3	195,8	—
(2-Бромэтил)-циклогексан	$C_8H_{15}Br$	38,7	66,6	80,5	95,8	113,0	123,7	138,0	160,0	186,2	213,0	—
1,2-Бутадиен	C_4H_6	—89,0	—72,7	—64,2	—54,9	—44,3	—37,5	—28,3	—14,2	+1,8	18,5	—
1,3-Бутадиен	C_4H_6	—102,8	—87,6	—79,7	—71,0	—61,3	—55,1	—46,8	—33,9	—19,3	—4,5	—108,9
Бутан	C_4H_{10}	—101,5	—85,7	—77,8	—68,9	—59,1	—52,8	—44,2	—31,2	—16,3	—0,5	—135,0
1,3-Бутандиол	$C_4H_{10}O_2$	22,2	67,5	85,3	100,0	117,4	127,5	141,2	161,0	183,8	206,5	77
2,3-Бутандиол	$C_4H_{10}O_2$	44,0	68,4	80,3	93,4	107,8	116,3	127,8	145,6	164,0	182,0	22,5
2-Бутанон	C_4H_8O	—48,3	—28,0	—17,7	—6,5	+6,0	14,0	25,0	41,6	60,0	79,6	—85,9
1,2,3-Бутантриол	$C_4H_{10}O_3$	102,0	132,0	146,0	161,0	178,0	188,0	202,5	222,0	243,5	264,0	—
1-Бутен	C_4H_8	—104,8	—89,4	—81,6	—73,0	—63,4	—57,2	—48,9	—36,2	—21,7	—6,3	—130
цис-2-Бутен	C_4H_8	—96,4	—81,1	—73,4	—64,6	—54,7	—48,4	—39,8	—26,8	—12,0	+3,7	—138,9
транс-2-Бутен	C_4H_8	—99,4	—84,0	—76,3	—67,5	—57,6	—51,3	—42,7	—29,7	—14,8	+0,9	—105,4
Бутенин	C_4H_4	—93,2	—77,7	—70,0	—61,3	—51,7	—45,3	—37,1	—24,1	—10,1	+5,3	—
3-Бутеннитрил	C_4H_5N	—19,6	+2,9	14,1	26,6	40,0	48,8	60,2	78,0	98,0	119,0	—
Бутилакрилат	$C_7H_{12}O_2$	—0,5	+23,5	35,5	48,6	63,4	72,6	85,1	104,0	125,2	147,4	—64,6
Бутилбензол	$C_{10}H_{14}$	22,7	48,8	62,0	76,3	92,4	102,6	116,2	136,9	159,2	183,1	—81,2
втор-Бутилбензол	$C_{10}H_{14}$	18,6	44,2	57,0	70,6	86,2	96,0	109,5	128,8	150,3	173,5	—82,7
трет-Бутилбензол	$C_{10}H_{14}$	13,0	39,0	51,7	65,6	80,8	90,6	103,8	123,7	145,8	168,5	—58,0
втор-Бутилглицколат	$C_6H_{12}O_3$	28,3	53,6	66,0	79,8	94,2	104,0	116,4	135,5	155,6	177,5	—
4-трет-Бутил-2-крезол	$C_{11}H_{16}O$	74,3	103,7	118,0	134,0	150,8	161,7	176,2	197,8	221,8	247,0	—
2-трет-Бутил-4-крезол	$C_{11}H_{16}O$	70,0	98,0	112,0	127,2	143,9	153,7	167,0	187,8	210,0	232,6	—
4-трет-Бутил-2,5-ксиленол	$C_{12}H_{18}O$	88,2	119,8	135,0	151,0	169,8	180,3	195,0	217,5	241,3	265,3	—
4-трет-Бутил-2,6-ксиленол	$C_{12}H_{18}O$	74,0	103,9	119,0	135,0	152,2	163,6	176,0	196,0	217,8	239,8	—
6-трет-Бутил-2,4-ксиленол	$C_{12}H_{18}O$	70,3	100,2	115,0	131,0	148,5	158,2	172,0	192,3	214,2	236,5	—
6-трет-Бутил-3,4-ксиленол	$C_{12}H_{18}O$	83,9	113,6	127,0	143,0	159,7	170,0	184,0	204,5	226,7	249,5	—
Бутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	—1,2	+20,0	30,2	41,5	53,4	60,3	70,1	84,3	100,8	117,5	—79,9

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
втор-Бутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	-12,2	+7,2	16,9	27,3	38,1	45,2	54,1	67,9	83,9	99,5	-114,7
трет-Бутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	-20,4	-3,0	+5,5	14,3	24,5	31,0	39,8	52,7	68,0	82,9	25,3
Бутилтриметилсилан	$C_7H_{18}Si$	-23,4	-1,3	+9,9	22,1	35,9	44,7	56,3	74,0	93,8	115,0	—
Бутилтриэтилсилан	$C_{10}H_{24}Si$	27,1	53,8	67,5	82,0	98,3	109,3	123,2	144,0	167,5	192,0	—
4-трет-Бутилфенилди-хлорфосфат	$C_{10}H_{13}Cl_2O_2P$	96,0	129,6	146,0	164,0	184,3	197,2	214,3	240,0	268,2	299,0	—
4-трет-Бутилфенилсалицилат	$C_{17}H_{18}O_3$	166,2	206,6	225,0	247,3	270,7	285,5	305,8	336,0	370,6	404,0P	—
2-(4-трет-Бутилфенокси)-этилацетат	$C_{14}H_{20}O_3$	118,0	150,0	165,8	183,3	201,5	212,8	228,0	250,3	277,6	304,4	—
2-втор-Бутилфенол	$C_{10}H_{14}O$	57,4	86,0	100,8	116,1	133,4	143,9	157,3	179,7	203,8	228,0	—
2-трет-Бутилфенол	$C_{10}H_{14}O$	56,6	84,2	98,1	113,0	129,2	140,0	153,5	173,8	196,3	219,5	—
4-втор-Бутилфенол	$C_{10}H_{14}O$	71,4	100,5	114,8	130,3	147,8	157,9	172,4	194,3	217,6	242,1	—
4-трет-Бутилфенол	$C_{10}H_{14}O$	70,0	99,2	114,0	129,5	146,0	156,0	170,2	191,5	214,0	238,0	99,0
Бутилформиат	$C_5H_{10}O_2$	-26,4	-4,7	+6,1	18,0	31,6	39,8	51,0	67,9	86,2	106,0	—
втор-Бутилформиат	$C_5H_{10}O_2$	-34,4	-13,3	-3,1	+8,4	21,3	29,6	40,2	56,8	75,2	93,6	—
трет-Бутилформиат	$C_5H_{10}O_2$	-32,7	-11,9	-1,2	+10,2	23,4	31,8	42,8	59,8	78,2	98,0	—
втор-Бутилхлорацетат	$C_6H_{11}ClO_2$	17,0	41,8	54,6	68,2	83,6	93,0	105,5	124,1	146,0	167,8	—
втор-Бутилхлорид	C_4H_9Cl	-60,2	-39,8	-29,2	-17,7	-5,0	+3,4	14,2	31,5	50,0	68,0	-131,3
трет-Бутилхлорид	C_4H_9Cl	—	—	—	—	-19,0	-11,4	-1,0	+14,6	32,6	51,0	-26,5
2-Бутил-2-этилбутан-1,3-диол	$C_{10}H_{22}O_2$	94,1	122,6	136,8	151,2	167,8	178,0	191,9	212,0	233,5	255,0	—
2-трет-Бутил-4-этилфенол	$C_{12}H_{18}O$	76,3	106,2	121,0	137,0	154,0	165,4	179,0	200,3	223,8	247,8	—
1-Бутин	C_4H_6	-92,5	-76,7	-68,7	-59,9	-50,0	-43,4	-34,9	-21,6	-6,9	+8,7	-130
2-Бутин	C_4H_6	-73,0	-57,9	-50,5	-42,5	-33,9	-27,8	-18,8	-5,0	+10,6	27,2	-32,5
Бутиронитрил	C_4H_7N	-20,0	+2,1	13,4	25,7	38,4	47,3	59,0	76,7	96,8	117,5	—
Валериановая кислота	$C_5H_{10}O_2$	42,2	67,7	79,8	93,1	107,8	116,6	128,3	146,0	165,0	184,4	-34,5
α -Валеролактон	$C_5H_8O_2$	37,5	65,8	79,8	95,2	101,9	122,4	136,5	157,7	182,3	207,5	—
Валеронитрил	C_5H_9N	-6,0	+18,1	30,0	43,3	57,8	66,9	78,6	97,7	118,7	140,8	—
Ванилин	$C_8H_8O_3$	107,0	138,4	154,0	170,5	188,7	199,8	214,5	237,3	260,0	285,0	81,5
2-Виниланизол	$C_9H_{10}O$	41,9	68,0	81,0	94,7	110,0	119,8	132,3	151,8	172,1	194,0П	—
3-Виниланизол	$C_9H_{10}O$	43,4	69,9	83,0	97,2	112,5	122,3	135,3	154,0	175,8	197,5П	—
4-Виниланизол	$C_9H_{10}O$	45,2	72,0	85,7	100,0	116,0	126,1	139,7	159,0	182,0	204,5П	—
Винилацетат	$C_4H_6O_2$	-48,0	-28,0	-18,0	-7,0	+5,3	13,0	23,3	38,4	55,5	72,5	—
Винилтрихлорсилан [60]	$C_2H_3Cl_3Si$	—	—	-10,7	+1,3	14,5	22,9	34,2	51,3	70,5	90,6	—
Винилтриэтоксисилан [60]	$C_8H_{18}O_3Si$	—	—	49,4	62,6	77,2	86,4	98,9	117,6	138,6	160,5	—
4-Винилфенол	$C_{10}H_{12}O$	64,0	91,7	105,6	120,3	136,3	146,4	159,8	180,0	202,8	225,0П	—
Гвайол	$C_{12}H_{26}O$	100,0	132,0	148,0	165,0	184,0	195,8	211,9	235,3	261,2	288,0	91,0
Гексадекаметилгептасилоксан	$C_{16}H_{48}O_6Si_7$	93,2	123,6	138,5	154,2	171,8	183,3	198,0	219,5	244,7	270,0	—
Гексадекаметилциклооктасилоксан	$C_{16}H_{48}O_8Si_8$	103,5	135,3	150,5	167,7	186,3	197,5	213,8	236,7	263,0	290,0	31,5
Гексадекан	$C_{16}H_{34}$	105,3	135,2	149,8	164,7	181,3	193,2	208,5	231,7	258,3	287,5	18,5
2-Гексадеканон	$C_{16}H_{32}O$	109,8	151,5	167,3	184,6	203,7	215,0	230,5	254,4	279,8	307,0	—
1-Гексадецен	$C_{16}H_{32}$	101,6	131,7	146,2	162,0	178,8	190,8	205,3	226,8	250,0	274,0	4,0
1,5-Гексадиен-3-ин	C_6H_6	-45,1	-24,4	-14,0	-2,8	+10,0	18,1	29,5	46,0	64,4	84,0	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Гексакозан	$C_{26}H_{54}$	204,0	240,0	257,4	275,8	295,2	307,8	323,2	348,4	374,6	399,8	56,6
Гексаметилдисилоксан	$C_6H_6OSi_2$	—29,0	—7,8	+2,8	14,0	26,7	34,7	45,6	61,6	80,0	99,2	—
Гексаметилциклотрисилоксан	$C_6H_{18}O_3Si_2$	—	—	—	—	—	67,5	78,7	95,9	114,7	134,0	64,0
Гексан	C_6H_{14}	—53,9	—34,5	—25,0	—14,1	—2,3	+5,4	15,8	31,6	49,6	68,7	—95,3
1-Гексанол	$C_6H_{14}O$	24,4	47,2	58,2	70,3	83,7	92,0	102,8	119,6	138,0	157,0	—51,6
2-Гексанол	$C_6H_{14}O$	14,6	34,8	45,0	55,9	67,9	76,0	87,3	103,7	121,8	139,8	—
3-Гексанол	$C_6H_{14}O$	2,5	25,7	36,7	49,0	62,2	70,7	81,8	98,3	117,0	135,5	—
2-Гексанон	$C_6H_{12}O$	7,7	28,8	38,8	50,0	62,0	69,8	79,8	94,3	111,0	127,5	—56,9
Гексахлорбензол	C_6Cl_6	114,4	149,3	166,4	185,7	206,0	219,0	235,5	258,5	283,5	309,4	230,0
Гексахлорэтан	C_2Cl_6	32,7	49,8	73,5	87,6	102,3	112,0	124,2	143,1	163,8	185,6	186,6
Гексаэтилбензол	$C_{18}H_{30}$	—	134,3	150,3	168,0	187,7	199,7	216,0	241,7	268,5	298,3	130,0
Гексаэтилциклотрисилоксан	$C_{12}H_{30}O_3Si_3$	—	—	123,0	137,1	152,9	163,1	177,1	198,6	223,6	250,3	—
1-Гексен	C_6H_{12}	—57,5	—38,0	—28,1	—17,2	—5,0	+2,8	13,0	29,0	46,8	66,0	—98,5
Гексиллевулинат	$C_{11}H_{20}O_3$	90,0	120,0	134,7	150,2	167,8	179,0	193,6	215,7	241,0	266,8	—
Гексилтриметилсилан	$C_6H_{22}Si$	6,7	32,0	44,8	58,5	74,0	83,8	97,2	117,0	139,9	163,0	—
Генэйкозан	$C_{21}H_{44}$	152,6	188,0	205,4	223,2	243,4	255,3	272,0	296,5	323,8	350,5	40,4
Гептадекан	$C_{17}H_{36}$	115,0	145,2	160,0	177,7	195,8	207,3	223,0	247,8	274,5	303,0	22,5
2-Гептадеканон	$C_{17}H_{34}O$	129,6	161,6	178,0	196,4	214,3	226,7	242,0	265,8	291,7	319,5	—
Гептакозан	$C_{27}H_{56}$	211,7	248,6	266,8	284,6	305,7	318,3	333,5	359,4	385,0	410,6	59,5
Гептан	C_7H_{16}	—34,0	—12,7	—2,1	+9,5	22,3	30,6	41,8	58,7	78,0	98,4	—90,6
1-Гептанол	$C_7H_{16}O$	42,4	64,3	74,7	85,8	99,8	108,0	119,5	136,6	155,6	175,8	34,6
2-Гептанон	$C_7H_{14}O$	19,3	43,6	55,5	67,7	81,2	89,8	100,0	116,1	133,2	150,2	—
4-Гептанон	$C_7H_{14}O$	23,0	44,4	55,0	66,2	78,1	85,8	96,0	111,2	127,3	143,7	—32,6
2-Гептен	C_7H_{14}	—35,8	—14,1	—3,5	+8,3	21,5	30,0	41,3	58,6	78,1	98,5	—
Гептилбензол	$C_{13}H_{20}$	66,2	94,8	109,0	124,2	141,6	151,5	165,7	186,6	210,0	233,0	—
Гепилтриметилсилан	$C_{10}H_{24}Si$	22,3	48,7	62,1	76,4	92,4	102,9	116,5	137,0	159,8	184,0	—
Геранилацетат	$C_{15}H_{20}O_2$	73,5	102,7	117,9	133,0	150,0	160,3	175,2	196,3	219,8	243,3P	—
Геранилбутират	$C_{14}H_{24}O_2$	96,8	125,2	139,0	153,8	170,1	180,2	193,8	214,0	235,0	257,4	—
Геранилизобутират	$C_{14}H_{24}O_2$	90,7	119,6	133,0	147,9	164,0	174,0	187,7	207,6	228,5	251,0	—
Геранилформиат	$C_{11}H_{18}O_2$	61,8	90,3	104,3	119,8	136,2	147,2	160,7	182,6	205,8	230,0	—
Гераниол	$C_{10}H_{18}O$	69,2	96,8	110,0	125,6	141,8	151,5	165,3	185,6	207,8	230,0	—
Гидрокориная кислота	$C_9H_{10}O_2$	102,2	133,5	148,7	165,0	183,3	194,0	209,0	230,8	255,0	279,8	48,5
Гидрохинон	$C_6H_6O_2$	132,4	153,3	163,5	174,6	192,0	203,0	216,5	238,0	262,5	286,2	170,3
Гликольдиацетат	$C_6H_{10}O_4$	38,3	64,1	77,1	90,8	106,1	115,8	128,0	147,8	168,3	190,5	—31,0
Глицерин	$C_3H_8O_3$	125,5	153,8	167,2	182,2	198,0	208,0	220,1	240,0	263,0	290,0	17,9
Глутаровая кислота	$C_5H_8O_4$	155,5	183,8	196,0	210,5	226,3	235,5	247,0	265,0	283,5	303,0	97,5
Глутаровый ангидрид	$C_5H_6O_3$	100,8	133,3	149,5	166,0	185,5	196,2	212,5	236,5	261,0	287,0	—
Глутаронитрил	$C_5H_6N_2$	91,3	123,7	140,0	156,5	176,4	189,5	205,5	230,0	257,3	286,2	—
Глутерилхлорид	$C_5H_6Cl_2O_2$	56,1	84,0	97,8	112,3	128,3	139,1	151,8	172,4	195,3	217,0	—
Дегидрацетовая кислота	$C_5H_6O_4$	91,7	122,0	137,3	153,0	171,0	181,5	197,5	219,5	244,5	269,0	—
Дезоксибензонн	$C_{14}H_{12}O$	123,3	156,2	173,5	192,0	212,0	224,5	241,3	265,2	293,0	321,0	60,0
Декаметилтетрасилоксан	$C_{10}H_{30}O_4Si_4$	35,3	61,5	74,3	88,5	104,0	114,2	127,3	147,4	169,8	193,5	—
Декаметилциклопентасилоксан	$C_{10}H_{30}O_5Si_5$	45,2	72,3	86,2	101,0	117,7	127,8	142,0	162,0	186,0	210,0	—38,0
цис-Декалин	$C_{10}H_{18}$	22,5	50,1	64,2	79,8	97,2	108,0	123,2	145,4	169,9	194,6	—43,3

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
<i>транс</i> -Декалин	$C_{10}H_{18}$	-0,8	+30,6	47,2	65,3	85,7	98,4	114,6	136,2	160,1	186,7	-30,7
Декан	$C_{10}H_{22}$	17,1	42,5	55,4	69,1	84,6	94,6	108,0	127,8	149,9	173,0	-29,7
Декан-2-он	$C_{10}H_{20}O$	44,2	71,9	85,8	100,7	117,1	127,8	142,0	163,2	186,7	211,0	3,5
1-Децен	$C_{10}H_{20}$	14,7	40,3	53,7	67,8	83,3	93,5	106,5	126,7	149,2	192,0	—
Дециловый спирт	$C_{10}H_{22}O$	69,5	97,3	111,3	125,8	142,1	152,0	165,8	186,2	208,8	231,0	7,0
Децилтриметилсилан	$C_{13}H_{30}Si$	67,4	96,4	111,0	126,5	144,0	154,3	169,5	191,0	215,5	240,0	—
Децилтриэтилсилан	$C_{16}H_{36}Si$	108,5	140,1	155,6	172,4	191,7	203,5	218,3	241,0	267,5	293,0	—
Диаллилдихлорсилан	$C_6H_{10}Cl_2Si$	9,5	34,8	47,4	61,3	76,4	86,3	99,7	119,4	142,0	165,3	—
Диаллилсульфид	$C_6H_{10}S$	-9,5	+14,4	26,6	39,7	54,2	63,7	75,8	94,8	116,1	138,6	-83,0
Диацетамид	$C_4H_7NO_2$	70,0	95,0	108,0	122,6	138,2	148,0	160,6	180,8	202,0	223,0	78,5
Дибензил	$C_{14}H_{14}$	86,8	119,8	136,0	153,7	173,7	186,0	202,8	227,8	255,0	284,0	51,5
Дибензиламин	$C_{14}H_{15}N$	118,3	149,8	165,6	182,2	200,2	212,2	227,3	249,8	274,3	300,0	-26,0
1,4-Дибромбензол	$C_6H_4Br_2$	61,0	79,3	87,7	103,6	120,8	131,6	146,5	168,5	192,5	218,6	87,5
1,2-Дибромбутан	$C_4H_8Br_2$	7,5	33,2	46,1	60,0	76,0	86,0	99,8	120,2	143,5	166,3	-64,5
<i>dl</i> -2,3-Дибромбутан	$C_4H_8Br_2$	5,0	30,0	41,6	56,4	72,0	82,0	95,3	115,7	138,0	160,5	—
<i>мезо</i> -2,3-Дибромбутан	$C_4H_8Br_2$	1,5	26,6	39,3	53,2	68,2	78,0	91,7	111,8	134,2	157,3	-34,5
1,4-Дибромбутан	$C_4H_8Br_2$	32,0	58,8	72,4	87,6	104,0	115,1	128,7	149,8	173,8	197,5	-20
1,2-Дибромдекан	$C_{10}H_{20}Br_2$	95,7	123,6	137,3	151,0	167,4	177,5	190,2	209,6	229,8	250,4	—
α , β -Диброммалениновый ангидрид	$C_4H_2Br_2O_3$	50,0	78,0	92,0	106,7	123,5	133,8	147,7	168,0	192,0	215,0	—
Дибромметан	CH_2Br_2	-35,1	-13,2	-2,4	+9,7	23,3	31,6	42,3	58,5	79,8	98,6	-52,8
1,2-Дибром-2-метилпропан	$C_4H_8Br_2$	-28,8	-3,0	+10,5	25,7	42,3	53,7	68,8	92,1	119,8	149,0	-70,3
1,3-Дибром-2-метилпропан	$C_4H_8Br_2$	14,0	40,0	53,0	67,5	83,5	93,7	107,4	117,8	150,6	174,6	—
1,2-Дибромпентан	$C_5H_{10}Br_2$	19,8	45,4	58,0	72,0	87,4	97,4	110,1	130,2	151,8	175,0	—
1,2-Дибромпропан	$C_3H_6Br_2$	-7,0	+17,3	29,4	42,3	57,2	66,4	78,7	97,8	118,5	141,6	-55,5
1,3-Дибромпропан	$C_3H_6Br_2$	9,7	35,4	48,0	62,1	77,8	87,8	101,3	121,7	144,1	167,5	-34,4
2,3-Дибром-1-пропанол	$C_3H_6Br_2O$	57,0	84,5	98,2	113,5	129,8	140,0	153,0	173,8	196,0	219,0	—
2,3-Дибромпропилен	$C_3H_4Br_2$	-6,0	+17,9	30,0	43,2	57,8	67,0	79,5	98,0	119,5	141,2	—
1,2-Дибромэтан	$C_2H_4Br_2$	-27,0	+4,7	18,6	32,7	48,0	57,9	70,4	89,8	110,1	131,5	10
(1,2-Дибромэтил)-бензол	$C_8H_8Br_2$	86,0	115,6	129,8	145,2	161,8	172,2	186,3	207,8	230,0	254,0	—
Ди-(2-бромэтиловый) эфир	$C_4H_8Br_2O$	47,7	75,3	88,5	103,6	119,8	130,0	144,0	165,0	188,0	212,5	—
Дибутилдисульфид	$C_8H_{16}S_2$	34,6	73,4	94,0	117,5	145,1	163,0	188,0	227,8	275,5	330,5	—
2,6-Ди- <i>трет</i> -бутил-4-крезол	$C_{16}H_{24}O$	85,8	116,2	131,0	147,0	164,1	175,2	190,0	212,8	237,6	262,5	—
4,6-Ди- <i>трет</i> -бутил-2-крезол	$C_{16}H_{24}O$	86,2	117,3	132,4	149,0	167,4	179,0	194,0	217,5	243,4	269,3	—
4,6-Ди- <i>трет</i> -бутил-3-крезол	$C_{16}H_{24}O$	103,7	135,2	150,0	167,0	185,3	196,1	211,0	233,0	257,1	282,0	—
Дибутилсульфид	$C_8H_{18}S$	21,7	51,8	66,4	80,5	96,0	105,8	118,6	138,0	159,0	182,0	-79,7
2,4-Ди- <i>трет</i> -бутилфенол	$C_{14}H_{22}O$	84,5	115,4	130,0	146,0	164,3	175,8	190,0	212,5	237,0	260,8	—
Дибутилфталат	$C_{16}H_{22}O_4$	148,2	182,1	198,2	216,2	235,8	247,8	263,7	287,0	313,5	340,0	—
2,6-Ди- <i>трет</i> -бутил-4-этилфенол	$C_{16}H_{26}O$	89,1	121,4	137,0	154,0	172,1	183,9	198,0	220,0	244,0	268,6	—
4,6-Ди- <i>трет</i> -бутил-3-этилфенол	$C_{16}H_{26}O$	111,5	142,6	157,4	174,0	192,3	204,4	218,0	241,7	264,6	290,0	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
1, 3-Дивинилбензол	$C_{10}H_{10}$	32,7	60,0	73,8	88,7	105,5	116,0	130,0	151,4	175,2	199,5П	—66,9
Дигидрокарвеол	$C_{10}H_{18}O$	63,9	91,6	105,0	120,2	136,1	146,3	159,8	180,1	202,8	225,0	—
<i>l</i> -Дигидрокарвон	$C_{10}H_{18}O$	46,6	75,5	90,0	106,0	123,7	134,7	149,7	171,8	197,0	223,0	—
1, 4-Дигидроксиантрахинон	$C_{14}H_8O_4$	196,7	239,8	259,8	282,0	307,4	323,2	344,5	377,8P	413,0P	450,0P	194,0
Дигидроцитронеллол	$C_{10}H_{22}O_2$	68,0	91,7	103,0	115,0	127,6	136,7	145,9	160,2	176,8	193,5	—
Диизоамиловый эфир	$C_{10}H_{22}O$	18,6	44,3	57,0	70,7	86,3	96,0	109,6	129,0	150,3	173,4	—
Диизоамилосалат	$C_{12}H_{22}O_4$	85,4	116,0	131,4	147,7	165,7	177,0	192,2	215,0	240,0	265,0	—
Диизоамилсульфид	$C_{10}H_{22}S$	43,0	73,0	87,6	102,7	120,0	130,6	145,3	166,4	191,0	216,0	—
Диизобутиламин	$C_8H_{19}N$	—5,1	+18,4	30,6	43,7	57,8	67,0	79,2	97,6	118,0	139,5	—70,0
Диизобутилоксалат	$C_{10}H_{18}O_4$	63,2	91,2	105,3	120,3	137,5	147,8	161,8	183,5	205,8	229,5	—
Диизобутил- <i>d</i> -тарат	$C_{12}H_{22}O_6$	117,8	151,8	169,0	188,0	208,5	221,6	239,5	264,7	294,0	324,0	73,5
1, 2-Диизопропилбензол	$C_{12}H_{18}$	40,0	67,8	81,8	96,8	114,0	124,3	138,7	159,8	184,3	209,0	—
1, 3-Диизопропилбензол	$C_{12}H_{18}$	34,7	62,3	76,0	91,2	107,9	118,2	132,3	153,7	177,6	202,0	—105,0
Диизопропиловый эфир	$C_6H_{14}O$	—57,0	—37,4	—27,4	—16,7	—4,5	+3,4	13,7	30,0	48,2	67,5	—60,0
Диизопропилоксалат	$C_8H_{14}O_4$	43,2	69,0	81,9	95,6	110,5	120,0	132,6	151,2	171,8	193,5	—
Диизопропил- <i>d</i> -тарат	$C_{10}H_{18}O_6$	103,7	133,7	148,2	164,0	181,8	192,6	207,3	228,2	251,8	275,0	—
Дикарвакрилмоно-(6-хлор-2-ксенил)-фосфат	$C_{32}H_{34}ClO_4P$	204,2	234,5	249,3	264,5	280,5	290,7	304,9	323,8	342,0	361,0	—
Дикарвакрил-2-толил-фосфат	$C_{27}H_{33}O_4P$	180,2	209,3	221,8	237,0	251,5	260,3	272,5	290,0	309,8	330,0	—
Диметиламин	C_2H_7N	—87,7	—72,2	—64,6	—56,0	—46,7	—40,7	—32,6	—20,4	—7,1	+7,4	—96,0
N, N-Диметиланилин	$C_8H_{11}N$	29,5	56,3	70,0	84,8	101,6	111,9	125,8	146,5	169,2	193,1	2,5
Диметиларсанилат	$C_8H_{12}AsNO_3$	15,0	39,6	51,8	65,0	79,7	88,6	101,0	119,8	140,3	160,5	—
Ди-(α -метилбензиловый) эфир	$C_{16}H_{18}O$	96,7	128,3	144,0	160,3	179,6	191,5	206,8	229,7	254,8	281,0	—
2, 2-Диметилбутан	C_6H_{14}	—69,3	—50,7	—41,5	—31,1	—19,5	—12,1	—2,0	+13,4	31,0	49,7	—99,8
2, 3-Диметилбутан	C_6H_{14}	—63,6	—44,5	—34,9	—24,1	—12,4	—4,9	+5,4	21,1	39,0	58,0	—128,2
2, 2-Диметилгексан	C_8H_{18}	—29,7	—7,9	+3,1	15,0	28,2	36,7	48,2	65,7	85,6	106,8	—
2, 3-Диметилгексан	C_8H_{18}	—23,0	—1,1	+9,9	22,1	35,6	44,2	56,0	73,8	94,1	115,6	—
2, 4-Диметилгексан	C_8H_{18}	—26,9	—5,3	+5,2	17,2	30,5	39,0	50,6	68,1	88,2	109,4	—
2, 5-Диметилгексан	C_8H_{18}	—26,7	—5,5	+5,3	17,2	30,4	38,9	50,5	68,0	87,9	109,1	—90,7
3, 3-Диметилгексан	C_8H_{18}	—25,8	—4,4	+6,1	18,2	31,7	40,4	52,5	70,0	90,4	112,0	—
3, 4-Диметилгексан	C_8H_{18}	—22,1	+0,2	11,3	23,5	37,1	45,8	57,7	75,6	96,0	117,7	—
Диметилдиборан	$C_2H_{10}B_2$	—106,5	—90,3	—82,1	—73,0	—62,4	—55,8	—47,0	—33,7	—18,8	—2,6	—150,2
Диметилдихлорсилан [60]	$C_2H_6Cl_2Si$	—	—	—24,8	—13,7	—1,4	+6,5	17,2	33,2	51,4	70,5	—
Диметилитаконат	$C_7H_{10}O_4$	69,3	94,0	106,6	119,7	133,7	142,6	153,7	171,0	189,8	208,0	38,0
Диметил- <i>l</i> -малат	$C_6H_{10}O_5$	75,4	104,0	118,3	133,8	150,1	160,4	175,1	196,3	219,5	242,6	—
Диметилмалеат	$C_6H_8O_4$	45,7	73,0	86,4	101,3	117,2	127,1	140,3	160,0	182,2	205,0	—
Диметилмалонат	$C_6H_8O_4$	35,0	59,8	72,0	85,0	100,0	109,7	121,9	140,0	159,8	180,7	—62
<i>транс</i> -Диметилмезаконат	$C_7H_{10}O_4$	46,8	74,0	87,8	102,1	118,0	127,8	141,5	161,0	183,5	206,0	—
Диметиловый эфир	C_2H_6O	—115,7	—101,1	—93,3	—85,2	—76,2	—70,4	—62,7	—50,9	—37,8	—23,7	—138,5
Диметилосалат	$C_8H_6O_4$	20,0	44,0	56,0	69,4	83,6	92,8	104,8	123,3	143,3	163,3	—
2, 7-Диметилоктан	$C_{10}H_{22}$	6,3	30,5	42,3	55,8	71,2	80,8	93,9	114,0	136,0	159,7	—52,8
2, 2-Диметилпентан	C_7H_{16}	—49,0	—28,7	—18,7	—7,5	+5,0	13,0	23,0	40,3	59,2	79,2	—123,7
2, 3-Диметилпентан	C_7H_{16}	—42,0	—20,8	—10,3	+1,1	13,9	22,1	33,3	50,1	69,4	89,8	—135,0
2, 4-Диметилпентан	C_7H_{16}	—48,0	—27,4	—17,1	—5,9	+6,5	14,5	25,4	41,8	60,6	80,5	—119,5
3, 3-Диметилпентан	C_7H_{16}	—45,9	—25,0	—14,4	—2,9	+9,9	18,1	29,3	46,2	65,5	86,1	—135,0

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
2,5-Диметил-3-пентанол	$C_7H_{14}O$	5,2	26,5	36,7	47,7	59,6	67,2	77,0	91,8	108,0	123,7	—
3,5-Диметил-1,2-пирон	$C_7H_8O_2$	78,6	107,6	122,0	136,4	152,7	163,8	177,5	198,0	221,0	245,0	51,5
2,2-Диметилпропан	C_5H_{12}	—102,0	—85,4	—76,7	—67,2	—56,1	—49,0	—39,1	—23,7	—7,1	+9,5	—16,6
4,6-Диметилрезорцин	$C_8H_{10}O_2$	49,0	76,8	90,7	105,8	122,5	133,2	147,3	167,8	192,0	215,0	—
Диметилсебадинат	$C_{12}H_{22}O_4$	104,0	139,8	156,2	175,8	196,0	208,0	222,6	245,0	269,6	293,5	38,0
Диметилсилан	C_2H_6Si	—115,0	—101,5	—93,1	—84,8	—75,7	—69,7	—61,4	—48,9	—35,0	—20,1	—
2,4-Диметилстирол	$C_{10}H_{12}$	34,2	61,9	75,8	90,8	107,7	118,0	132,3	153,2	177,5	202,0П	—
2,5-Диметилстирол	$C_{10}H_{12}$	29,0	55,9	69,0	84,0	100,2	110,7	124,7	145,6	168,7	193,0П	—
Диметилсульфид	C_2H_6S	—75,6	—58,0	—49,2	—39,4	—28,4	—21,4	—12,0	+2,6	18,7	36,0	—83,2
Диметилсурьма	C_2H_6Sb	44,0	72,0	86,0	101,7	118,3	129,4	143,5	164,0	187,2	211,0	—
Диметил- <i>dl</i> -тарtrat	$C_6H_{10}O_6$	100,4	131,8	147,5	164,0	182,4	193,8	209,5	232,3	257,4	282,0	89,0
Диметил- <i>d</i> -тарtrat	$C_6H_{10}O_6$	102,1	133,2	148,2	164,3	182,4	193,8	208,8	230,5	255,0	280,0	61,5
3,3-Диметил-2-тиобутан [61]	$C_5H_{12}S$	—34,7	—13,8	—3,3	+8,4	21,5	29,8	41,2	58,4	78,0	98,9	—88,3
N, N-Диметил-2-толуидин	$C_9H_{13}N$	28,8	54,1	66,2	80,2	95,0	105,2	118,1	138,3	161,5	184,8	—61,0
N, N-Диметил-4-толуидин	$C_9H_{13}N$	50,1	74,3	86,7	100,0	116,3	126,4	140,3	161,6	185,4	209,5	—
Диметилфенилсилан	$C_8H_{12}Si$	5,3	30,3	42,6	56,2	71,4	81,3	94,2	114,2	136,4	159,3	—
Диметилфталат	$C_{10}H_{10}O_4$	100,3	131,8	147,6	164,0	182,8	194,0	210,0	232,7	257,8	283,7	—
1,1-Диметилциклогексан	C_8H_{16}	—24,4	—1,4	+10,3	23,0	37,3	45,7	57,9	76,2	97,2	119,5	—34,0
<i>цис</i> -1,2-Диметилциклогексан	C_8H_{16}	—15,9	+7,3	18,4	31,1	45,3	54,4	66,8	85,6	107,0	129,7	—50,0
<i>транс</i> -1,2-Диметилциклогексан	C_8H_{16}	—21,1	+1,7	13,0	25,6	39,7	48,7	61,0	79,6	100,9	123,4	—88,0
<i>цис</i> -1,3-Диметилциклогексан	C_8H_{16}	—19,4	+3,4	14,9	27,4	41,4	50,4	62,5	81,0	102,1	124,4	—92,0
<i>транс</i> -1,3-Диметилциклогексан	C_8H_{16}	—22,7	0,0	+11,2	23,6	37,5	46,4	58,5	76,9	97,8	120,1	—76,2
<i>цис</i> -1,4-Диметилциклогексан	C_8H_{16}	—20,0	+3,2	14,5	27,1	41,1	50,1	62,3	80,8	101,9	124,3	—87,4
<i>транс</i> -1,4-Диметилциклогексан	C_8H_{16}	—24,3	—1,7	+10,1	22,6	36,5	45,4	57,6	76,0	97,0	119,3	—36,9
Диметилцитратонат	$C_7H_{10}O_4$	50,8	78,2	91,8	106,5	122,6	132,7	145,8	165,8	188,0	210,5	—
α , α -Диметилантарный ангидрид	$C_6H_8O_3$	61,4	88,1	102,0	116,3	132,3	142,4	155,3	175,8	197,5	219,5	—
1,2-Диметоксизетан	$C_4H_{10}O_2$	—48,0	—26,2	—15,3	—3,0	+10,7	19,7	31,8	50,0	70,8	93,0	—
Ди-(2-метоксиэтиловый) эфир	$C_6H_{14}O_3$	13,0	37,6	50,0	63,0	77,5	86,8	99,5	118,0	138,5	159,8	—
Ди-(нитрозометил)-амин	$C_2H_5N_3O_2$	3,2	27,8	40,0	53,7	68,2	77,7	90,3	110,0	131,3	153,0	—
Ди-(нитроэтил)-амин	$C_4H_9N_3O_2$	18,5	44,5	57,7	71,8	87,6	97,6	111,0	131,4	153,5	176,9	—
1,4-Диоксан	$C_4H_8O_2$	—35,8	—12,8	—1,2	+12,0	25,2	33,8	45,1	62,3	81,8	101,1	10,0
1,4-Диоксан-2,6-дион	$C_4H_4O_4$	—	103,0	116,6	132,0	148,6	158,2	173,2	194,0	217,0	240,0	97,0
Диофенол	$C_{10}H_{16}O_2$	66,7	95,4	109,0	124,0	141,2	151,3	165,6	186,2	209,5	232,0	—
Дипентен	$C_{10}H_{16}$	14,0	40,4	53,8	68,2	84,3	94,6	108,3	128,2	150,5	174,6	—
Дипропиленгликоль	$C_6H_{14}O_3$	73,8	102,1	116,2	131,3	147,4	156,5	169,9	189,9	210,5	231,8	—
Дипропиленгликоль, изопропиловый эфир	$C_9H_{20}O_3$	46,0	72,8	86,2	100,8	117,0	126,8	140,3	160,0	183,1	205,6	—
Дипропиленгликоль, монобутиловый эфир	$C_{10}H_{22}O_3$	64,7	92,0	106,0	120,4	136,3	146,3	159,8	180,0	203,8	227,0	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Дипропиловый эфир	$C_6H_{14}O$	-43,3	-22,3	-11,8	0,0	+13,2	21,6	33,0	50,3	69,5	89,5	-122,0
Дипропилоксалат	$C_8H_{14}O_4$	53,4	80,2	93,9	108,6	124,6	134,8	148,1	168,0	190,3	213,5	—
Дипропилсукцинат	$C_{10}H_{18}O_4$	77,5	107,6	122,2	138,0	154,8	166,0	180,3	202,5	226,5	250,8	—
Дипропил- <i>d</i> -тарат	$C_{10}H_{18}O_6$	115,6	147,7	163,5	180,4	199,7	211,7	227,0	250,0	275,6	303,0	—
1,2-Дипропоксизтан	$C_8H_{18}O_2$	-38,8	-10,3	+5,0	22,3	42,3	55,8	74,2	103,8	140,0	180,0	—
Дифенил	$C_{12}H_{10}$	70,6	101,8	117,0	134,2	152,5	165,2	180,7	204,2	229,4	254,9	69,5
Дифениламин	$C_{12}H_{11}N$	108,3	141,7	157,0	175,2	194,3	206,9	222,8	247,5	274,1	302,0	52,9
1,1-Дифенилгидразин	$C_{12}H_{12}N_2$	126,0	159,3	176,1	194,0	213,5	225,9	242,5	267,2	294,0	322,2	44,0
Дифенилдисульфид	$C_{12}H_{10}S_2$	131,6	164,0	180,0	197,0	214,8	226,2	241,3	262,6	285,8	310,0	61,0
Дифенилдихлорсилан [60]	$C_{12}H_{10}Cl_2Si$	—	—	158,4	175,2	194,0	205,9	222,2	246,8	274,8	304,4	—
Дифенилметан	$C_{12}H_{12}$	76,0	107,4	122,8	139,8	157,8	170,2	186,3	210,7	237,5	264,5	26,5
Дифениловый эфир	$C_{12}H_{10}O$	66,1	97,8	114,0	130,8	150,0	162,0	178,8	203,3	230,7	258,5	27,0
1-Дифенилокси-2,3-эпоксипропан	$C_{16}H_{14}O_2$	135,3	169,9	187,2	205,8	226,3	239,7	255,0	280,4	309,8	340,0	—
1,3-Дифенил-2-пропанон	$C_{15}H_{14}O$	125,5	159,8	177,6	195,7	216,6	229,4	246,6	272,3	301,7	330,5	34,5
Дифенилселенид	$C_{12}H_{10}Se$	105,7	138,4	154,4	172,2	192,2	204,8	220,8	246,1	273,2	301,5	2,5
Дифенилсульфид	$C_{12}H_{10}S$	96,1	129,0	145,0	162,0	182,8	194,8	211,8	236,8	263,9	292,5	—
Дифенил-2-толилтиофосфат	$C_{18}H_{17}O_3PS$	159,7	179,8	201,6	215,5	230,6	240,4	252,5	270,3	290,0	310,0	—
Дифенилхлорфосфат	$C_{12}H_{10}ClPO_3$	121,5	160,5	182,0	203,8	227,9	244,2	265,0	299,5	337,2	378,0	—
1,1-Дифенилэтилен	$C_{14}H_{12}$	87,4	119,6	135,0	151,8	170,8	183,4	198,6	222,8	249,8	277,0	—
<i>транс</i> -Дифенилэтилен	$C_{14}H_{12}$	113,2	145,8	161,0	179,8	199,0	211,5	227,4	251,7	287,3	306,5	124,0
Дифтордифенилсилан	$C_{12}H_{10}F_2Si$	68,4	100,1	115,5	131,8	149,8	160,6	176,3	199,5	225,4	252,5	—
1,1-Дифторэтан	$C_2H_4F_2$	-112,5	-98,4	-91,7	-84,1	-75,8	-70,4	-63,2	-52,0	-39,5	-26,5	-117,0
1,2-Дихлорбензол	$C_6H_4Cl_2$	20,0	46,0	59,1	73,4	89,4	99,5	112,9	133,4	155,8	179,0	-17,6
1,3-Дихлорбензол	$C_6H_4Cl_2$	12,1	39,0	52,0	66,2	82,0	92,2	105,0	125,9	149,0	173,0	-24,2
1,4-Дихлорбензол	$C_6H_4Cl_2$	—	—	54,8	69,2	84,8	95,2	108,4	128,3	150,2	173,9	53,0
1,2-Дихлорбутан	$C_4H_8Cl_2$	-23,6	-0,3	+11,5	24,5	37,7	47,8	60,2	79,7	100,8	123,5	-80,4
2,3-Дихлорбутан	$C_4H_8Cl_2$	-25,2	-3,0	+8,5	21,2	35,0	43,9	55,0	74,0	94,2	116,0	—
1,5-Дихлоргексаметилтрисилоксан	$C_8H_{18}Cl_2O_2Si_3$	26,0	52,0	65,1	79,0	94,8	105,0	118,2	138,3	160,2	184,0	-53,0
Дихлордиизопропиловый эфир	$C_6H_{12}Cl_2O$	29,6	55,2	68,2	82,2	97,3	106,9	119,7	139,0	159,8	182,7	—
Дихлордиметилсилан	$C_2H_6Cl_2Si$	-53,5	-33,8	-23,8	-12,7	-0,4	+7,4	17,5	33,9	51,9	70,3	-86,0
Дихлордифенилсилан	$C_{12}H_{10}Cl_2Si$	109,6	142,4	158,0	176,0	195,5	207,5	223,8	248,0	275,5	304,0	—
Дихлордиформетан	CCl_2F_2	-118,5	-104,6	-97,8	-90,1	-81,6	-76,1	-68,6	-57,0	-43,9	-29,8	—
1,2-Дихлор-1,2-дифторэтилен	$C_2Cl_2F_2$	-82,0	-65,6	-57,3	-48,3	-38,2	-31,8	-23,0	-10,0	+5,0	20,9	-112
Дихлордиэтилсилан	$C_4H_{10}Cl_2Si$	-9,2	+13,7	25,4	37,7	51,6	60,0	71,8	89,8	110,0	130,4	—
Дихлорметан	CH_2Cl_2	-70,0	-52,1	-43,3	-33,4	-22,3	-15,7	-6,3	+8,0	24,1	40,7	-96,7
Дихлорметиларсин	CH_3AsCl_2	-11,1	+12,2	24,3	37,0	51,5	60,6	73,0	91,8	112,7	134,5	-59
1,1-Дихлор-2-метилпропан	$C_4H_8Cl_2$	-31,0	-8,8	+2,6	15,2	29,3	38,0	50,0	67,7	85,8	105,0	—
1,2-Дихлор-2-метилпропан	$C_4H_8Cl_2$	-25,8	-4,2	+6,7	18,7	32,0	40,2	51,7	68,9	87,8	108,0	—
1,3-Дихлор-2-метилпропан	$C_4H_8Cl_2$	-3,0	+20,6	32,0	44,8	58,6	67,5	78,8	93,1	115,4	135,0	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Дихлорметилсилан	$\text{CH}_3\text{Cl}_2\text{Si}$	-75,0	-56,9	-47,8	-37,7	-26,2	-18,9	-9,0	+6,2	23,7	41,9	—
Дихлорметилфенилсилан [60]	$\text{C}_7\text{H}_8\text{Cl}_2\text{Si}$	35,7	63,5	77,4	92,4	109,5	120,0	134,2	155,5	180,2	205,5	—
Дихлор-1-нафтилсилан	$\text{C}_{10}\text{H}_8\text{Cl}_2\text{Si}$	106,2	134,6	149,2	164,5	181,7	192,0	205,9	225,5	249,7	273,3	—
1,7-Дихлороктаметилтетрасилоксан	$\text{C}_8\text{H}_{24}\text{Cl}_2\text{O}_3\text{Si}_4$	53,3	81,7	95,8	111,0	127,8	139,0	152,7	174,2	197,8	222,0	-62,0
1,2-Дихлорпропан	$\text{C}_3\text{H}_6\text{Cl}_2$	-38,5	-17,0	-6,1	+6,0	19,4	28,0	39,4	57,0	76,0	96,8	—
1,3-Дихлор-2-пропанол	$\text{C}_3\text{H}_6\text{Cl}_2\text{O}$	28,0	52,2	64,7	78,0	93,0	102,0	114,8	133,3	153,5	174,3	—
2,3-Дихлорстирол	$\text{C}_8\text{H}_6\text{Cl}_2$	61,0	90,1	104,6	120,5	137,8	149,0	163,5	185,7P	210,0P	235,0P	—
2,4-Дихлорстирол	$\text{C}_8\text{H}_6\text{Cl}_2$	53,5	82,2	97,4	111,8	129,2	140,0	153,8	176,0P	200,0P	225,0P	—
2,5-Дихлорстирол	$\text{C}_8\text{H}_6\text{Cl}_2$	55,5	83,9	98,2	114,0	131,0	142,0	155,8	178,0P	202,5P	227,0P	—
2,6-Дихлорстирол	$\text{C}_8\text{H}_6\text{Cl}_2$	47,8	75,7	90,0	105,5	122,4	133,3	147,6	169,0P	193,5P	217,0P	—
3,4-Дихлорстирол	$\text{C}_8\text{H}_6\text{Cl}_2$	57,2	86,0	100,4	116,2	133,7	144,6	158,2	181,5P	205,7P	230,0P	—
3,5-Дихлорстирол	$\text{C}_8\text{H}_6\text{Cl}_2$	53,5	82,2	97,4	111,8	129,2	140,0	153,8	176,0P	200,0P	225,0P	—
1,3-Дихлортетраметилдисилоксан	$\text{C}_4\text{H}_{12}\text{Cl}_2\text{OSi}_2$	-7,4	+16,3	28,3	41,0	55,7	64,8	76,9	95,8	116,3	138,0	-37
1,2-Дихлор-1,1,2,2-тетрафторэтан	$\text{C}_2\text{Cl}_2\text{F}_4$	-95,4	-80,0	-72,3	-63,5	-53,7	-47,5	-39,1	-26,3	-12,0	+3,5	-94
1,2-Дихлортетраэтилбензол	$\text{C}_{14}\text{H}_{20}\text{Cl}_2$	105,6	138,7	155,0	172,5	192,2	204,8	220,7	245,6	272,8	302,0	—
1,4-Дихлортетраэтилбензол	$\text{C}_{14}\text{H}_{20}\text{Cl}_2$	91,7	126,1	143,8	162,0	183,2	195,8	212,0	238,5	265,8	296,5	—
Дихлор-4-толилсилан	$\text{C}_7\text{H}_8\text{Cl}_2\text{Si}$	46,2	71,7	84,2	97,8	113,2	122,6	135,5	153,5	175,2	196,3	—
α , α -Дихлортолуол	$\text{C}_7\text{H}_8\text{Cl}_2$	35,4	64,0	78,7	94,3	112,1	123,4	138,3	160,7	187,0	214,0	-16,1
3,4-Дихлор- α , α -трифтортолуол	$\text{C}_7\text{H}_8\text{Cl}_2\text{F}_3$	11,0	38,3	52,2	67,3	84,0	95,0	109,0	129,0	150,5	172,8	-12,1
Дихлоруксусная кислота	$\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2\text{O}_2$	44,0	69,8	82,6	96,3	111,8	121,5	134,0	152,3	173,7	194,4	9,7
Дихлорфенилларсин	$\text{C}_6\text{H}_5\text{AsCl}_2$	61,8	100,0	116,0	133,1	151,0	163,2	178,9	202,8	228,8	256,5	—
α , α -Дихлорфенилацетонитрил	$\text{C}_8\text{H}_5\text{Cl}_2\text{N}$	56,0	84,0	98,1	113,8	130,0	141,0	154,5	176,2	199,5	223,5	—
2,4-Дихлорфенол	$\text{C}_6\text{H}_4\text{Cl}_2\text{O}$	53,0	80,0	92,8	107,7	123,4	133,5	146,0	165,2	187,5	210,0	45,0
2,6-Дихлорфенол	$\text{C}_6\text{H}_4\text{Cl}_2\text{O}$	59,5	87,6	101,1	115,5	131,6	141,8	154,6	175,5	197,7	220,0	—
Дихлорфторметан	CHCl_2F	-91,3	-75,5	-67,5	-58,6	-48,8	-42,6	-33,9	-20,9	-6,2	+8,9	-135
1,1-Дихлорэтан [62]	$\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$	-61,4	-42,4	-32,8	-22,3	-10,7	-3,3	+6,8	21,9	39,1	57,1	-97,0
1,2-Дихлорэтан	$\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$	-44,5	-24,0	-13,6	-2,4	+10,0	18,1	29,4	45,7	64,0	82,4	-35,3
1,2-Дихлор-3-этилбензол	$\text{C}_8\text{H}_8\text{Cl}_2$	46,0	75,0	90,0	105,9	123,8	135,0	149,8	172,0	197,0	221,1	-40,8
1,2-Дихлор-4-этилбензол	$\text{C}_8\text{H}_8\text{Cl}_2$	47,0	77,2	92,3	109,6	127,5	139,0	153,3	176,0	201,7	226,6	-76,4
1,4-Дихлор-2-этилбензол	$\text{C}_8\text{H}_8\text{Cl}_2$	38,5	68,0	83,2	99,8	118,0	129,0	144,0	166,2	191,5	216,3	-61,2
1,1-Дихлорэтилен	$\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2$	-77,2	-60,0	-51,2	-41,7	-31,1	-24,0	-15,0	-1,0	+14,8	31,7	-122,5
цис-1,2-Дихлорэтилен	$\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2$	-58,4	-39,2	-29,9	-19,4	-7,9	-0,5	+9,5	24,6	41,0	59,0	-80,5
транс-1,2-Дихлорэтилен	$\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2$	-65,4	-47,2	-38,0	-28,0	-17,0	-10,0	-0,2	+14,3	30,8	47,8	-50,0
Ди-(хлорэтиловый) эфир	$\text{C}_4\text{H}_8\text{Cl}_2\text{O}$	23,5	49,3	62,0	76,0	91,5	101,5	114,5	134,0	155,4	178,5	—
1,2-Дихлорэтилтрихлорсилан [60]	$\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}_6\text{Si}$	—	—	61,1	75,7	91,6	101,7	115,2	135,2	157,6	180,6	—
Дихлорэтилфенилсилан	$\text{C}_8\text{H}_9\text{Cl}_2\text{Si}$	48,5	77,8	92,3	108,7	126,2	137,8	152,3	175,7	200,0	225,5	—
Ди-(2-хлорэтокси)-метан	$\text{C}_5\text{H}_{10}\text{Cl}_2\text{O}$	53,0	80,4	94,0	109,5	125,5	135,8	149,6	170,0	192,0	215,0	—
Дихлорэтоксиметилсилан	$\text{C}_3\text{H}_8\text{Cl}_2\text{OSi}$	-33,8	-12,1	-1,3	+11,3	24,4	32,6	44,1	61,0	80,3	100,6	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Дихлорэтоксифенилсилан	$C_6H_{10}Cl_2OSi$	52,4	80,7	94,6	110,0	126,2	137,5	151,4	172,6	197,2	222,2	—
Дициан	C_2N_2	—95,8	—83,2	—76,8	—70,1	—62,7	—57,9	—51,8	—42,6	—33,0	—21,0	34,4
Дициклопентадиен	$C_{10}H_8$	—	34,1	47,6	62,0	77,9	88,0	101,7	121,8	144,2	166,6P	32,9
Диэтиладипат	$C_{10}H_{18}O_4$	74,0	106,6	123,0	138,3	154,6	165,8	179,0	198,2	219,1	240,0	—21,0
Диэтиламин	$C_4H_{11}N$	—	—	—33,0	—22,6	—11,3	—4,0	+6,0	21,0	38,0	55,5	—38,9
N-Диэтиланилин	$C_{10}H_{15}N$	49,7	78,0	91,9	107,2	123,6	133,8	147,3	168,2	192,4	215,5	—34,4
Диэтиларсанилат	$C_{10}H_{16}AsNO_3$	38,0	62,6	74,8	88,0	102,6	111,8	123,8	141,9	161,1	181,0	—
Диэтилацеталь	$C_6H_{14}O_2$	—23,0	—2,3	+8,0	19,6	31,9	39,8	50,1	66,3	84,0	102,2	—
1,2-Диэтилбензол	$C_{10}H_{14}$	25,6	50,6	63,3	76,9	92,0	101,7	114,7	133,6	154,3	176,5	—
1,3-Диэтилбензол	$C_{10}H_{14}$	21,7	47,8	60,9	75,5	91,4	101,7	115,4	135,8	157,9	182,2	—84,2
1,4-Диэтилбензол	$C_{10}H_{14}$	19,4	45,8	59,0	73,4	89,8	100,0	114,0	134,8	157,7	182,5	—
Диэтилгексадециламин	$C_{20}H_{43}N$	139,8	175,8	194,0	213,5	235,0	248,5	265,5	292,8	324,6	355,0	—
Диэтилглутарат	$C_8H_{16}O_4$	65,6	94,7	109,7	125,4	142,8	153,2	167,8	189,5	212,8	237,0	—
Диэтилдиксисукцинат	$C_8H_{10}O_6$	70,0	98,0	112,0	126,8	143,8	153,7	167,7	188,0	210,8	233,5	—
Диэтилдифторсилан	$C_4H_{10}F_2Si$	—56,8	—38,1	—28,8	—18,6	—7,3	—0,2	+9,8	24,2	40,5	58,0	—
Диэтилдихлорсилан [60]	$C_2H_5Cl_2Si$	—	—	21,0	33,7	47,9	56,9	69,1	87,5	108,4	130,4	—
Диэтиленгликоль	$C_4H_{10}O_3$	91,8	120,0	133,8	148,0	164,3	174,0	187,5	207,0	226,5	244,8	—
Диэтиленгликоль, бутиловый эфир	$C_8H_{18}O_3$	70,0	95,7	107,8	120,5	135,5	146,0	159,8	181,2	205,0	231,2	—
Диэтиленгликоль, этиловый эфир	$C_6H_{14}O_3$	45,3	72,0	85,8	100,3	116,7	126,8	140,3	159,0	180,3	201,9	—
Диэтиленгликоль-бисхлорацетат	$C_8H_{12}Cl_2O_5$	148,3	180,0	195,8	212,0	229,0	239,5	252,0	271,5	291,8	313,0	—
Диэтилизосукцинат	$C_8H_{14}O_4$	39,8	66,7	80,0	94,7	111,0	121,4	134,8	155,1	177,7	201,3	—
Диэтилитакокат	$C_8H_{14}O_4$	51,3	80,2	95,2	111,0	128,2	139,9	154,3	177,5	203,1	227,9	—
Диэтилкарбонат	$C_6H_{10}O_3$	—10,1	+12,3	23,8	36,0	49,5	57,9	69,7	86,5	105,8	125,8	—43
Диэтилмалат	$C_8H_{14}O_5$	80,7	110,4	125,6	141,2	157,8	169,0	183,9	205,3	229,5	253,4	—
Диэтилмаленат	$C_8H_{12}O_4$	57,3	85,6	100,0	115,3	131,8	142,4	156,0	177,8	201,7	225,0	—
Диэтилмалонат	$C_7H_{12}O_4$	40,0	67,5	81,3	95,9	113,3	123,0	136,2	155,5	176,8	198,9	—49,8
Диэтилмезаконат	$C_7H_{12}O_4$	62,8	91,0	105,3	120,3	137,3	147,9	161,6	183,2	205,8	229,0	—
Диэтиловый эфир	$C_4H_{10}O$	—74,3	—56,9	—48,1	—38,5	—27,7	—21,8	—11,5	+2,2	17,9	34,6	—116,3
Диэтилоксалат	$C_6H_{10}O_4$	47,4	71,8	83,8	96,8	110,6	119,7	130,8	147,9	166,2	185,7	—40,6
Диэтил-γ-оксаозелат	$C_{11}H_{18}O_5$	121,0	150,3	165,7	181,0	197,7	208,3	221,6	242,6	264,5	286,0	—
Диэтилсебацнат	$C_{14}H_{26}O_4$	125,3	156,2	172,1	189,8	207,5	218,4	234,4	255,8	280,3	305,5	1,3
Диэтилселенид	$C_6H_{10}Se$	—25,7	—4,0	+7,0	19,0	31,2	40,3	51,8	69,0	88,0	108,0	—
2,5-Диэтилстирол	$C_{12}H_{16}$	49,7	78,4	92,6	108,5	125,8	136,8	151,0	173,2	198,0	223,0П	—
Диэтилсукцинат	$C_8H_{14}O_4$	54,6	83,0	96,6	111,7	127,8	138,2	151,1	171,7	193,8	216,5	—20,8
Диэтилсульфат	$C_4H_{10}O_4S$	47,0	74,0	87,7	102,1	118,0	128,6	142,5	162,5	185,5	209,5P	—25,0
Диэтилсульфид	$C_4H_{10}S$	—39,6	—18,6	—8,0	+3,5	16,1	24,2	35,0	51,3	69,7	88,0	—99,5
Диэтилсульфит	$C_4H_{10}O_3S$	10,0	34,2	46,4	59,7	74,2	83,8	96,3	115,8	137,0	159,0	—
Диэтил-d-тарат	$C_8H_{14}O_6$	102,0	133,0	148,0	164,2	182,3	194,0	208,5	230,4	254,8	280,0	—
Диэтил-dl-тарат	$C_8H_{14}O_6$	100,0	131,7	147,2	163,8	181,7	193,2	208,0	230,0	254,3	280,0	—
3,5-Диэтилтолуол	$C_{11}H_{16}$	31,8	59,0	72,7	87,8	104,0	115,3	129,1	150,1	174,0	199,0	—
Диэтилфталат	$C_{12}H_{14}O_4$	108,8	140,7	156,0	173,6	192,1	204,1	219,5	243,0	267,5	294,0	—
Диэтилфумарат	$C_8H_{12}O_4$	53,2	81,2	95,3	110,2	126,7	137,7	151,1	172,2	195,8	218,5	0,6
Диэтилцинк	$C_4H_{10}Zn$	—22,4	0,0	+11,7	24,2	38,0	47,2	59,1	77,0	97,3	118,0	—28
цис-Диэтилцитрат	$C_9H_{14}O_4$	59,8	88,3	103,0	118,2	135,7	146,2	160,0	182,3	206,5	230,3	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Диэтилэтилмалонат	$C_8H_{16}O_4$	50,8	77,8	91,6	106,0	122,4	132,4	146,0	166,0	188,7	211,5	—
Диэтилэтилметилмалонат	$C_{10}H_{18}O_4$	44,7	72,0	85,7	100,3	116,7	126,7	140,8	161,0	184,1	207,5	—
1,15-Диэтоксигексадекаметилоктасилоксан	$C_{20}H_{36}O_8Si_8$	133,7	164,5	179,7	196,0	213,8	224,7	240,0	261,8	286,0	311,5	—
1,5-Диэтоксигексаметилтрисилоксан	$C_{10}H_{20}O_4Si_3$	41,8	68,0	80,7	94,5	110,0	120,0	133,2	152,0	174,0	196,6	—
1,9-Диэтоксидекаметилпентасилоксан	$C_{14}H_{26}O_6Si_5$	89,0	117,5	131,5	146,3	162,2	172,5	187,0	207,0	230,0	253,3	—
Диэтоксидиметилсилан	$C_6H_{16}O_2Si$	—19,1	+2,4	13,3	25,3	38,0	46,3	57,6	74,2	93,2	113,5	—
Диэтоксидифенилсилан	$C_{16}H_{26}O_2Si$	111,5	142,8	157,6	174,3	193,2	205,0	220,0	243,8	259,7	296,0	—
1,11-Диэтоксидодекаметилгексасилоксан	$C_{16}H_{40}O_7Si_6$	103,6	133,4	147,5	163,0	180,0	190,5	205,5	226,7	250,0	273,5	—
Диэтоксметилфенилсилан	$C_{11}H_{18}O_2Si$	56,5	83,6	97,2	112,0	127,5	137,8	151,2	171,6	193,8	216,5	—
1,7-Диэтоксидекаметилтетрасилоксан	$C_{12}H_{24}O_6Si_4$	67,7	95,2	108,6	123,0	139,0	148,5	162,0	182,3	204,0	227,5	—
1,13-Диэтокситетрадекаметилгептасилоксан	$C_{18}H_{32}O_8Si_7$	119,0	149,2	163,5	180,0	197,0	208,2	223,2	244,7	268,2	293,5	—
1,3-Диэтокситетраметилдисилоксан	$C_8H_{22}O_3Si_2$	14,8	39,3	51,2	64,3	78,7	87,9	100,3	118,8	139,8	160,7	—
1,2-Диэтоксизтан	$C_6H_{14}O_2$	—33,5	—10,2	+1,6	14,7	29,7	39,0	51,8	71,8	94,1	119,5	—
Дициан	C_2N_2	—95,8	—83,2	—76,8	—70,1	—62,7	—57,9	—51,8	—42,6	—33,0	—21,0	—34,4
Додекаметилпентасилоксан	$C_{12}H_{36}O_4Si_5$	56,6	84,1	98,0	112,7	128,8	139,4	162,8	173,8	196,5	220,5	—
Додекаметилциклогексасилоксан	$C_{12}H_{36}O_6Si_6$	67,3	95,6	110,0	124,7	141,8	151,8	166,3	187,4	210,6	236,0	—3,0
Додекан	$C_{12}H_{26}$	47,7	75,7	89,9	104,3	121,4	131,7	145,5	165,8	188,4	214,5	—9,6
Додекан-2-он	$C_{12}H_{24}O$	77,1	106,0	120,4	136,0	152,4	163,8	177,5	199,0	222,5	246,5	—
1-Додецен	$C_{12}H_{24}$	47,2	74,0	87,8	102,4	118,6	128,5	142,3	162,2	185,5	208,0	—31,5
Додециламин	$C_{12}H_{27}N$	82,8	111,8	127,8	141,6	157,4	168,0	182,1	203,0	225,0	248,0	—
Додециловый спирт	$C_{12}H_{26}O$	91,0	120,2	134,7	150,0	167,2	177,8	192,0	213,0	235,7	259,0	24,0
Додецилтриметилсилан	$C_{16}H_{34}Si$	91,2	122,1	137,7	153,8	172,1	184,2	199,5	222,0	248,0	273,0	—
Докозаметилдекасилиоксан	$C_{22}H_{46}O_8Si_{10}$	160,3	189,8	202,8	217,5	233,8	243,0	255,0	273,5	293,8	314,0	—
Докозан	$C_{22}H_{46}$	157,8	195,4	213,0	233,5	254,5	268,3	286,0	314,2	343,5	376,0	44,5
Изоамилацетат	$C_7H_{14}O_2$	0,0	23,7	35,2	47,8	62,1	71,0	83,2	101,3	121,5	142,0	—
Изоамилбензоат	$C_{12}H_{16}O_2$	72,0	104,5	121,6	139,7	158,3	171,4	186,8	210,2	235,8	262,0	—
Изоамилбутират	$C_9H_{18}O_2$	21,2	47,1	59,9	74,0	90,0	99,8	113,1	133,2	155,3	178,6	—
Изоамилизобутират	$C_9H_{18}O_2$	14,8	40,1	52,8	66,6	81,8	91,7	104,4	124,2	146,0	168,8	—
Изоамилизоналерат	$C_{10}H_{20}O_2$	27,0	54,4	68,6	83,8	100,6	111,3	125,1	146,1	169,5	194,0	—
Изоамиллевулинат	$C_{10}H_{18}O_3$	75,6	104,0	118,8	134,4	151,7	162,6	177,0	198,1	222,7	247,9	—
Изоамилнитрат	$C_8H_{11}NO_3$	5,2	28,8	40,3	53,5	67,6	76,3	88,6	106,7	126,5	147,5	—
Изоамиловый спирт	$C_8H_{12}O$	10,0	30,9	40,8	51,7	63,4	71,0	80,7	95,8	113,7	130,6	—117,2
Изоамилформиат	$C_6H_{12}O_2$	—17,5	+5,4	17,1	30,0	44,0	53,3	65,4	83,2	102,7	123,3	—
Изобутиламин	$C_4H_{11}N$	—50,0	—31,0	—21,0	—10,3	+1,3	8,8	18,8	32,0	50,7	68,6	—85,0
Изобутилацетат	$C_6H_{12}O_2$	—21,2	+1,4	12,8	25,5	39,2	48,0	59,7	77,6	97,5	118,0	—98,9
Изобутилбензоат	$C_{11}H_{14}O_2$	64,0	93,6	108,6	124,2	141,8	152,0	166,4	188,2	212,8	237,0	—
Изобутилбензол	$C_{10}H_{14}$	—9,8	+21,1	37,3	54,7	73,2	84,1	99,0	120,7	145,2	170,5	—
Изобутилбутират	$C_8H_{16}O_2$	4,6	30,0	42,2	56,1	71,7	81,3	94,0	113,9	135,7	156,9	—80,7

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Изобутилдихлорацетат	$C_6H_{10}Cl_2O_2$	28,6	54,3	67,5	81,4	96,7	106,6	119,8	142,0	160,0	183,0	—
Изобутилизобутират	$C_8H_{16}O_2$	4,1	28,0	39,9	52,4	67,2	75,9	88,0	106,3	126,3	147,5	—80,7
Изобутилизовалерат	$C_9H_{18}O_2$	16,0	41,2	53,8	67,7	82,7	92,4	105,2	124,8	146,4	168,7	—
Изобутилкарбамат	$C_6H_{11}NO_2$	—	83,7	96,4	110,1	125,3	134,6	147,2	165,7	186,0	206,5	65,0
Изобутиллеулилат	$C_9H_{16}O_3$	65,0	92,1	105,9	120,2	136,2	147,0	160,2	181,8	205,5	229,9	—
Изобутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	—9,0	+11,0	21,7	32,4	44,1	51,7	61,5	75,9	91,4	108,0	—108,0
Изобутилпропионат	$C_7H_{14}O_2$	—2,3	+20,9	32,3	44,8	58,5	67,6	79,5	97,0	116,4	136,8	—71,0
4-Изобутилфенол	$C_{10}H_{14}O$	72,1	100,9	115,5	130,3	147,2	157,0	171,2	192,1	214,7	237,0	—
Изобутилформиат	$C_5H_{10}O_2$	—32,7	—11,4	—0,8	+11,0	24,1	32,4	43,4	60,0	79,0	98,2	—95,3
Изобутилхлорид	C_4H_9Cl	—53,8	—34,3	—24,5	—13,8	—1,9	+5,9	16,0	32,0	50,0	68,9	—131,2
2-Изобутронафтон	$C_{14}H_{14}O$	133,2	165,4	181,0	197,7	215,6	227,6	242,3	264,0	288,2	313,0	—
Изобутирофенон	$C_{11}H_{14}O$	58,3	87,0	101,4	116,8	133,8	144,6	158,0	180,1	204,2	228,0	—
Изовалериановая кислота	$C_6H_{10}O_2$	34,5	59,6	71,3	84,0	98,0	107,3	118,9	136,2	155,2	175,1	—37,6
Изокапролактон	$C_6H_{10}O_2$	38,3	66,4	80,3	95,7	112,3	123,2	137,2	157,8	182,1	207,0	—
Изокапронафтон	$C_{15}H_{16}O$	136,0	167,9	184,0	201,6	219,7	231,5	246,7	269,7	294,0	320,0	—
Изокапроновая кислота	$C_6H_{12}O_2$	66,2	83,0	94,0	107,0	120,4	129,6	141,4	158,3	181,0	207,7	—35,0
Изомасляная кислота	$C_5H_8O_2$	14,7	39,3	51,2	64,0	77,8	86,3	98,0	115,8	134,5	154,5	—47
Изопрен	C_5H_8	—79,8	—62,3	—53,3	—43,5	—32,6	—25,4	—16,0	—1,2	+15,4	32,6	—146,7
Изопропилацетат	$C_5H_{10}O_2$	—38,3	—17,4	—7,2	+4,2	17,0	25,1	35,7	51,7	69,8	89,0	—
4,4-Изопропилиденбисфенол	$C_{15}H_{16}O_2$	193,0	224,2	240,8	255,5	273,0	282,9	297,0	317,5	339,0	360,5	—
Изопропилизобутират	$C_7H_{14}O_2$	—16,3	+5,8	17,0	29,0	42,4	51,4	62,3	80,2	100,0	120,5	—
Изопропиллеулилат	$C_8H_{14}O_3$	48,0	74,5	88,0	102,4	118,1	127,8	141,8	161,6	185,2	208,2	—
2-Изопропилнафталин	$C_{18}H_{14}$	76,0	107,9	123,4	140,3	159,0	171,4	187,6	211,8	238,5	266,0	—
4-Изопропилстирол	$C_{11}H_{14}$	34,7	62,3	76,0	91,2	108,0	118,4	132,8	153,9	178,0	202,5P	—
2-Изопропилфенол	$C_9H_{12}O$	56,6	83,8	97,0	111,7	127,5	137,7	150,3	170,1	192,6	214,5	15,5
3-Изопропилфенол	$C_9H_{12}O$	62,0	90,3	104,1	119,8	136,2	146,6	160,2	182,0	205,0	228,0	26,0
4-Изопропилфенол	$C_9H_{12}O$	67,0	94,7	108,0	123,4	139,8	149,7	163,3	184,0	206,1	228,2	61,0
Изопропилформиат	$C_4H_8O_2$	—52,0	—32,7	—22,7	—12,1	—0,2	+7,5	17,8	33,6	50,5	68,3	—
Изопропилхлорацетат	$C_5H_9ClO_2$	3,8	28,1	40,2	53,9	68,7	78,0	90,3	108,8	128,0	148,6	—
Изофорон	$C_9H_{14}O$	38,0	66,7	81,2	96,8	114,5	125,6	140,6	163,3	188,7	215,2	—
Изохинолин	C_9H_7N	63,5	92,7	107,8	123,7	141,6	152,0	167,6	190,0	214,5	240,5	24,6
Изоэвгенол	$C_{10}H_{12}O_2$	86,3	117,0	132,4	149,0	167,0	178,2	194,0	217,2	242,3	267,5	—10,0
Индан	C_9H_8	16,4	44,3	58,5	73,9	90,8	100,8	114,7	135,6	157,8	181,6	—2,0
Иодбензол	C_6H_5I	24,1	50,6	64,0	78,3	94,4	105,0	118,3	139,8	163,9	188,6	—28,5
1-Иод-3-метилбутан	$C_5H_{11}I$	—2,5	+21,9	34,1	47,6	62,3	71,9	84,4	103,8	125,8	148,2	—
1-Иод-2-метилпропан	C_4H_9I	—17,0	+5,8	17,0	29,8	42,8	51,8	63,5	81,0	100,3	120,4	—90,7
Иоднонан	$C_9H_{19}I$	70,0	96,2	109,0	123,0	138,1	147,7	159,8	179,0	199,3	219,5	—
1-Иодоктан	$C_8H_{17}I$	45,8	74,8	90,0	105,9	123,8	135,4	150,0	173,3	199,3	225,5	—45,9
1-Иодпропан	C_3H_7I	—36,0	—13,5	—2,4	+10,0	23,6	32,1	43,8	61,8	81,8	102,5	—98,8
2-Иодпропан	C_3H_7I	—43,3	—22,1	—11,7	0,0	+13,2	21,6	32,8	50,0	69,5	89,5	—90
2-Иодтолуол	C_8H_9I	37,2	65,9	79,8	95,6	112,4	123,8	138,1	160,0	185,7	211,0	—
α -Ионон	$C_{15}H_{20}O$	79,5	108,8	123,0	139,0	155,6	166,3	181,2	202,5	225,2	250,0	—
Кадинен	$C_{15}H_{24}$	101,3	131,0	146,0	161,8	179,8	191,0	205,6	226,8	250,7	275,0	—
Камфен	$C_{10}H_{16}$	—	—	47,2	60,4	75,7	85,0	97,9	117,5	138,7	160,5	50,0
Камфиламин	$C_{10}H_{19}N$	45,3	74,0	83,7	97,6	112,5	122,0	134,6	153,0	173,8	195,0	—

Веществ	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Камфолоновая кислота	$C_{10}H_{16}O_2$	97,6	125,7	139,8	153,9	170,0	180,0	193,7	212,7	234,0	256,0	—
d-Камфора	$C_{15}H_{16}O$	41,5	68,6	82,3	97,5	114,0	124,0	138,0	157,9	182,0	209,2	178,5
Каприловая кислота	$C_8H_{16}O_2$	92,3	114,1	124,0	136,4	150,6	160,0	172,2	190,3	213,9	237,5	16,0
Каприловый альдегид	$C_8H_{16}O$	73,4	92,0	101,2	110,2	120,0	126,0	133,9	145,4	156,5	168,5	—
Каприлонитрил	$C_9H_{15}N$	43,0	67,6	80,4	94,6	110,6	121,2	134,8	155,2	179,5	204,5	—
Каприновая кислота	$C_{10}H_{20}O_2$	125,0	142,0	152,2	165,0	179,9	189,8	200,0	217,1	240,3	268,4	31,5
Каприновый альдегид	$C_{10}H_{20}O$	51,9	78,8	92,0	106,3	122,2	132,0	145,3	164,8	186,3	208,5	—
Капронитрил	$C_6H_{11}N$	9,2	34,6	47,5	61,7	76,9	86,8	99,8	119,7	141,0	163,7	—
Капроновая кислота	$C_6H_{12}O_2$	71,2	89,5	99,5	111,8	125,0	133,3	144,0	160,8	181,0	202,0	—1,5
Карбазол	$C_{12}H_9N$	—	—	—	—	—	248,2	265,0	292,5	323,0	354,8	244,8
Карбонилселенид	COSe	—117,1	—102,3	—95,0	—86,3	—76,4	—70,2	—61,7	—49,8	—35,6	—21,9	—
Карвакрол	$C_{10}H_{14}O$	70,0	98,4	113,2	127,9	145,2	155,3	169,7	191,2	213,8	237,0	0,5
Карвон	$C_{10}H_{14}O$	57,4	86,1	100,4	116,0	133,0	143,8	157,3	179,6	203,5	227,5	—
Коричная кислота	$C_9H_8O_2$	127,5	157,8	173,0	189,5	207,1	217,8	232,4	253,3	276,7	300,0	133,0
Коричный альдегид	C_9H_8O	76,1	105,8	120,0	135,7	152,2	163,7	177,7	199,3	222,4	246,0	—7,5
Коричный спирт	$C_9H_{10}O$	72,6	102,5	117,8	133,7	151,0	162,0	177,8	199,8	224,6	250,0	33,0
2-Крезол	C_7H_8O	38,2	64,0	76,7	90,5	105,8	115,5	127,4	146,7	168,4	190,8	30,8
3-Крезол	C_7H_8O	52,0	76,0	87,8	101,4	116,0	125,8	138,0	157,3	179,0	202,8	10,9
4-Крезол	C_7H_8O	53,0	76,5	88,6	102,3	117,7	127,0	140,0	157,7	179,4	201,8	35,5
α -Кротоновая кислота	$C_4H_6O_2$	33,5	57,4	69,0	82,0	96,0	104,5	116,3	133,9	152,2	171,9P	15,5
β -Кротоновая кислота	$C_4H_6O_2$	—	—	83,0	93,0	107,8	116,7	128,0	146,0	165,5	185,0	72,0
цис-Кротононитрил	C_4H_5N	—29,0	—7,1	+4,0	16,4	30,0	38,5	50,1	68,0	88,0	108,0	—
транс-Кротононитрил	C_4H_5N	—19,5	+3,5	15,0	27,8	41,8	50,9	62,8	81,1	101,5	122,8	—
2-Ксенилди хлорфосфат	$C_{12}H_9Cl_2PO$	138,2	171,7	187,0	205,0	223,8	236,0	251,5	275,3	301,5	328,5	—
2,4-Ксилальдегид	$C_8H_{10}O$	59,0	85,9	99,0	114,0	129,7	139,8	152,2	172,3	194,1	215,5	75,0
2,3-Ксиленол	$C_8H_{10}O$	56,0	83,8	97,6	112,0	129,2	139,5	152,2	173,0	196,0	218,0	75
2,4-Ксиленол	$C_8H_{10}O$	51,8	78,0	91,3	105,0	121,5	131,0	143,0	161,5	184,2	211,5	25,5
3,4-Ксиленол	$C_8H_{10}O$	66,2	93,8	107,7	122,0	138,0	148,0	161,0	181,5	203,6	225,2	62,5
3,5-Ксиленол	$C_8H_{10}O$	62,0	89,2	102,4	117,0	133,3	143,5	156,0	176,2	197,8	219,5	68,0
2,4-Ксилидин	$C_8H_{11}N$	52,6	79,8	93,0	107,6	123,8	133,7	146,8	166,4	188,3	211,5	—
2,6-Ксилидин	$C_8H_{11}N$	44,0	72,6	87,0	102,7	120,2	131,5	146,0	160,5	193,7	217,9	—
2-Ксилол	C_8H_{10}	—3,8	+20,2	32,1	45,1	59,5	68,8	81,3	100,2	121,7	144,4	—25,2
3-Ксилол	C_8H_{10}	—6,9	+16,8	28,3	41,1	55,3	64,4	76,8	95,5	116,7	139,1	—47,9
4-Ксилол	C_8H_{10}	—8,1	+15,5	27,3	40,1	54,4	63,5	75,9	94,6	115,9	138,3	13,3
Кумарин	$C_9H_6O_2$	106,0	137,8	153,4	170,0	189,0	200,5	216,5	240,0	264,7	291,0	70,0
4-Кумидин	$C_9H_{13}N$	60,0	88,2	102,2	117,8	134,2	145,0	158,0	180,0	203,2	227,2	—
Куминаль	$C_{10}H_{12}O$	58,0	87,3	102,0	117,9	135,2	146,0	160,0	182,8	206,7	232,0	—
Куминовый спирт	$C_{10}H_{14}O$	74,2	103,7	118,0	133,8	150,3	161,7	176,2	197,9	221,7	246,6	—
Кумол	C_9H_{12}	2,9	26,8	38,3	51,5	66,1	75,4	88,1	107,3	129,2	152,4	—96,0
Лауриновая кислота	$C_{12}H_{24}O_2$	121,0	150,6	166,0	183,6	201,4	212,7	227,5	249,8	273,8	299,2	48,0
Лауриновый альдегид	$C_{12}H_{24}O$	77,7	108,4	123,7	140,2	157,8	168,7	184,5	207,8	231,8	257,0	44,5
Левулиновая кислота	$C_5H_8O_3$	102,0	128,1	141,8	154,1	169,5	178,0	190,2	208,3	227,4	245,8P	33,5
Левулиновый альдегид	$C_5H_8O_2$	28,1	54,9	68,0	82,7	98,3	108,4	121,8	142,0	164,0	187,0	—
d-Лимонен	$C_{10}H_{16}$	14,0	40,4	53,8	68,2	84,3	94,6	108,3	128,5	151,4	175,0	—96,9
Линалилацетат	$C_{12}H_{20}O_2$	55,4	82,5	96,0	111,4	127,7	138,1	151,8	173,3	196,2	220,0P	—
d-Линалоол	$C_{10}H_{18}O$	40,0	66,5	79,8	93,8	109,9	120,0	133,3	153,0	175,6	198,0	—
Маленновый ангидрид	$C_4H_2O_3$	44,0	63,4	78,7	95,0	111,8	122,0	135,8	155,9	179,5	202,0	58
Масляная кислота	$C_4H_8O_2$	25,5	49,8	61,5	74,0	88,0	95,5	108,0	125,5	144,5	163,5	—4,7

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Мезитила окись	$C_8H_{10}O$	-8,7	+14,1	26,0	37,9	51,7	60,4	72,0	90,0	109,8	130,0	-59,0
Ментан	$C_{10}H_{20}$	9,7	35,7	48,3	62,7	78,3	88,6	102,1	122,7	146,0	169,5	—
Ментилацетат	$C_{12}H_{22}O_2$	57,4	85,8	100,0	115,4	132,1	143,2	156,7	178,8	202,8	227,0	—
Ментилбензоат	$C_{17}H_{24}O_2$	123,2	154,2	170,0	186,3	204,3	215,8	230,4	253,2	277,1	301,0	54,5
Ментилформиат	$C_{11}H_{20}O_2$	47,3	75,8	90,0	105,8	123,0	133,8	148,0	169,8	194,2	219,0	—
I-Ментол	$C_{10}H_{20}O$	56,0	83,2	96,0	110,3	126,1	136,1	149,4	168,3	190,2	212,0	42,5
Меркаптоуксусная кислота	$C_2H_4O_2S$	60,0	87,7	101,5	115,8	131,8	142,0	154,0P.	—	—	—	-16,5
Метакрилонитрил	C_4H_5N	-44,5	-23,3	-12,5	-0,6	+12,8	21,5	32,8	50,0	70,3	90,3	—
Метакриловая кислота	$C_4H_6O_2$	25,5	48,5	60,0	72,7	86,4	95,3	106,6	123,9	142,5	161,0	15
Метан	CH_4	-205,9	-199,0	-195,5	-191,8	-187,7	-185,1	-181,4	-175,5	-168,8	-161,5	-182,5
Метанол	CH_4O	-44,0	-25,3	-16,2	-6,0	+5,0	12,1	21,2	34,8	49,9	64,7	-97,8
Метилакрилат	$C_5H_8O_2$	-43,7	-23,6	-13,5	-2,7	+9,2	17,3	28,0	43,9	61,8	80,2П	—
Метиламин	CH_5N	-95,8	-81,3	-73,8	-65,9	-56,9	-51,3	-43,7	-32,4	-19,7	-6,3	-93,5
N-Метиланилин	C_8H_9N	36,0	62,8	76,2	90,5	106,0	115,8	129,8	149,3	172,0	195,5	-57,0
Метилантранилат	$C_8H_9NO_2$	77,6	109,0	124,2	141,5	159,7	172,0	187,8	212,4	238,5	266,5	24,0
N-Метилацетанилид	$C_9H_{11}NO$	—	103,8	118,6	135,1	152,2	164,2	179,8	202,3	227,4	253,0	102,0
Метилацетат	$C_5H_8O_2$	-57,2	-38,6	-29,3	-19,1	-7,9	-0,5	+9,4	24,0	40,0	57,8	-98,7
Метилацетилен	C_4H_4	-111,0	-97,5	-90,5	-82,9	-74,3	-68,8	-61,3	-49,8	-37,2	-23,3	-102,7
α -Метилбензиловый спирт	$C_8H_{10}O$	49,0	75,2	88,0	102,1	117,8	127,4	140,3	159,0	180,7	204,0	—
Метилбензоат	$C_8H_8O_2$	39,0	64,4	77,3	91,8	107,8	117,4	130,8	151,4	174,7	199,5	-12,5
2-Метилбензотиазол	C_8H_7NS	70,0	97,5	111,2	125,5	141,2	150,4	163,9	183,2	204,5	225,5	15,4
2-Метилбутан	C_5H_{12}	-82,9	-65,8	-57,0	-47,3	-36,5	-29,6	-20,2	-5,9	+10,5	27,8	-159,7
3-Метил-2-бутанон	$C_5H_{10}O$	-19,9	-1,0	+8,3	18,3	29,6	36,2	45,5	59,0	73,8	88,9	-92,0
2-Метил-1-бутен	C_5H_{10}	-89,1	-72,8	-64,3	-54,8	-44,1	-37,3	-23,0	-13,8	+2,5	20,2	-135,0
2-Метил-2-бутен	C_5H_{10}	-75,4	-57,0	-47,9	-37,9	-26,7	-19,4	-9,9	+4,9	21,6	38,5	-133,0
Метилбутират	$C_6H_{12}O_2$	-26,8	-5,5	+5,0	16,7	29,6	37,4	48,0	64,3	83,1	102,3	—
Метилбромид	CH_3Br	-96,3	-80,6	-72,8	-64,0	-54,2	-48,0	-39,4	-26,5	-11,9	+3,6	-93,0
2 Метилгексан	C_7H_{16}	-40,4	-19,5	-9,1	+2,3	14,9	28,0	34,1	50,8	69,8	90,0	-118,2
3-Метилгексан	C_7H_{16}	-39,0	-18,1	-7,8	+3,6	16,4	24,5	35,6	52,4	71,6	91,9	-119,4
2-Метилгептадекан	$C_{18}H_{38}$	119,8	152,0	168,7	186,0	204,8	216,3	231,5	254,5	279,8	306,5	—
2-Метилгептан	C_8H_{18}	-21,0	+1,3	12,3	24,4	37,9	46,6	58,3	76,0	96,2	117,6	-109,5
3-Метилгептан	C_8H_{18}	-19,8	+2,6	13,3	25,4	38,9	47,6	59,4	77,1	97,4	118,9	-120,8
4-Метилгептан	C_8H_{18}	-20,4	+1,5	12,4	24,5	38,0	46,6	58,3	76,1	96,3	117,7	-121,1
2-Метил-2-гептен	C_8H_{16}	-16,1	+6,7	17,8	30,4	44,0	52,8	64,6	82,3	102,2	122,5	—
6-Метил-3-гептен-2-ол	$C_8H_{16}O$	41,6	65,0	76,7	89,3	102,7	111,5	122,6	139,5	156,6	175,5	—
6-Метил-5-гептен-2-ол	$C_8H_{16}O$	41,9	66,0	77,8	90,4	104,0	112,8	123,8	140,0	156,6	174,3	—
Метилгликолат	$C_3H_6O_3$	9,6	33,7	45,3	58,1	72,3	81,8	93,7	111,8	131,7	151,5	—
α -Метилглутаровый ангидрид	$C_6H_8O_2$	93,8	125,4	141,8	157,7	177,5	189,9	205,0	229,1	255,5	282,5	—
2-Метилдисилазан	CH_3NSi_2	-76,3	-59,0	-50,1	-40,5	-29,6	-22,4	-13,1	+1,3	17,2	34,0	—
Метилдифениламин	$C_{13}H_{13}N$	103,5	134,0	149,7	165,8	184,0	195,4	210,1	232,8	257,0	282,0	-7,6
Метилдифенилсилан	$C_{13}H_{14}Si$	88,0	118,2	132,8	148,8	166,4	178,0	193,7	215,9	241,5	266,8	—
Метилдихлорацетат	$C_2H_4Cl_2O_2$	3,2	26,7	38,1	50,7	64,7	73,6	85,4	103,2	122,6	143,0	—
Метилдихлорсилан [60]	CH_3Cl_2Si	—	—	-47,1	-36,9	-25,5	-18,3	-8,5	+6,3	32,2	40,9	—
Метилизобутират	$C_6H_{12}O_2$	-34,1	-13,0	-2,9	+8,4	21,0	28,9	39,6	55,7	73,6	92,6	-84,7
Метилизопалерат	$C_6H_{12}O_2$	-19,2	+2,9	14,0	26,4	39,8	48,2	59,8	77,3	96,7	116,7	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Метилизотиоцианат	C_2H_3NS	-34,7	-8,3	+5,4	20,4	38,2	47,5	59,3	77,5	97,8	119,0	35,5
Метилиодид	CHI_3	—	-55,0	-45,8	-35,6	-24,2	-16,9	-7,0	+8,0	25,3	42,4	-64,4
Метилкаприлат	$C_9H_{18}O_2$	34,2	61,7	74,9	89,0	105,3	115,3	128,0	148,1	170,0	193,0 P	-40,0
Метилкапринат	$C_{11}H_{22}O_2$	63,7	93,5	108,0	123,0	139,0	148,6	161,5	181,6	202,9	224,0 P	-18,0
Метилкапронат	$C_8H_{16}O_2$	5,0	30,0	42,0	55,4	70,0	79,7	91,4	109,8	129,8	150,0	—
Метилкоричная кислота	$C_{10}H_{10}O_2$	125,7	155,0	169,8	185,2	201,8	212,0	224,8	245,0	266,8	288,0	—
Метиллаурилат	$C_{13}H_{26}O_2$	87,8	117,9	133,2	149,0	166,0	176,8	190,8	P	P	P	5,0
Метиллевулилат	$C_8H_{10}O_3$	39,8	66,4	79,7	93,7	109,5	119,3	133,0	153,4	175,8	197,7	—
Метилмеристинат	$C_8H_{10}O_2$	115,0	145,7	160,8	177,8	195,8	207,5	222,6	245,3	269,8	295,8	18,5
Метилмеркаптан	CH_3S	-90,7	-75,3	-67,5	-58,8	-49,2	-43,1	-34,8	-22,1	-7,9	+6,8	-121,0
Метилметакрилат	$C_5H_8O_2$	-30,5	-10,0	+1,0	11,0	25,5	34,5	47,0	63,0	82,0	101,0	—
Метилвый эфир коричной кислоты	$C_{10}H_{10}O_2$	77,4	108,1	123,0	140,0	157,9	170,0	185,8	209,6	235,0	263,0	33,4
Метилпальмитат	$C_{17}H_{34}O_2$	134,3	166,8	184,3	202,0 P	—	—	—	—	—	—	30,0
2-Метилпентан	C_6H_{14}	-60,9	-41,7	-32,1	-21,4	-9,7	-1,9	+8,1	24,1	41,6	60,3	-154,0
3-Метилпентан	C_6H_{14}	-59,0	-39,8	-30,1	-19,4	-7,3	+0,1	10,5	26,5	44,2	63,3	-118,0
2-Метил-1-пентанол	$C_6H_{14}O$	15,4	38,0	49,6	61,6	74,7	83,4	94,2	111,3	129,8	147,9	—
2-Метил-2-пентанол	$C_6H_{14}O$	-4,5	+16,8	27,6	38,8	51,3	58,8	69,2	85,0	102,6	121,1	-103,0
2-Метил-4-пентанол	$C_6H_{14}O$	-0,3	+22,1	33,3	45,4	58,2	67,0	78,0	94,9	113,5	131,7	—
4-Метил-2-пентанол	$C_6H_{14}O$	-1,4	+19,7	30,0	40,8	52,8	60,4	70,4	85,6	102,0	119,0	-84,7
2-Метилпропан	C_4H_{10}	-109,2	-94,1	-86,4	-77,9	-68,4	-62,4	-54,1	-41,5	-27,1	-11,7	-145,0
2-Метилпропен	C_4H_8	-105,1	-96,5	-81,9	-73,4	-63,8	-57,7	-49,3	-36,7	-22,2	-6,9	-140,3
4-Метилпропиофенон	$C_{10}H_{12}O$	59,6	89,3	103,8	120,2	138,0	149,3	164,2	187,4	212,7	238,5	—
Метилпропиловый эфир	$C_4H_{10}O$	-72,2	-54,3	-45,4	-35,4	-24,3	-17,4	-8,1	+6,0	22,5	39,1	—
Метилпропионат	$C_4H_8O_2$	-42,0	-21,5	-11,8	-1,0	+11,0	18,7	29,0	44,0	61,8	79,8	-87,5
2-Метилпропионил бромид	C_4H_7BrO	13,5	38,4	50,6	64,1	79,4	88,8	101,6	120,5	141,7	163,0	—
Метилсалицилат	$C_8H_8O_3$	54,0	81,6	95,3	110,0	126,2	136,7	150,0	172,6	197,5	223,2	-8,8
Метилсилан	CH_3Si	-138,5	-126,3	-120,0	-113,0	-104,8	-99,8	-93,0	-82,4	-70,3	-56,9	—
α -Метилстирол	C_9H_{10}	7,4	34,0	47,1	61,8	77,8	88,3	102,2	121,8	143,0	165,4 П	-23,2
β -Метилстирол	C_9H_{10}	17,5	43,8	57,0	71,5	87,7	97,8	111,7	132,0	154,7	179,0	-30,1
4-Метилстирол	C_9H_{10}	16,0	42,0	55,1	69,2	85,0	95,0	108,6	128,7	151,2	170,0 П	—
2-Метилтиофен	C_5H_6S	-27,4	-5,1	+6,0	18,3	32,3	41,2	53,1	71,1	91,8	112,5	-63,5
3-Метилтиофен	C_5H_6S	-24,5	-2,3	+9,1	21,5	35,4	44,0	55,8	73,6	93,8	115,4	-68,9
Метилизотиоцианат	C_2H_3NS	-14,0	+9,8	21,6	34,5	49,0	58,1	70,4	89,8	110,8	132,9	-51,0
Метилтрихлорсилан [60]	CH_3Cl_3Si	—	—	-27,3	-16,5	-4,6	+3,1	13,5	29,3	47,3	66,4	—
Метилуретан	$C_3H_8NO_2$	26,5	51,0	63,2	76,1	91,0	100,0	112,0	130,0	149,8	170,0	—
Метилформиат	$C_2H_4O_2$	-74,2	-57,0	-48,6	-39,2	-28,7	-21,9	-12,9	+0,8	16,0	32,0	-99,8
Метилфторид	CH_3F	-147,3	-137,0	-131,6	-125,9	-119,1	-115,0	-109,0	-99,9	-89,5	-78,2	—
2-Метилхинолин	$C_{10}H_9N$	75,3	104,0	119,0	134,0	150,8	161,7	176,2	197,8	211,7	246,5	-1,0
Метилхлорацетат	$C_3H_5ClO_2$	-2,9	+19,0	30,0	41,5	54,5	63,0	73,5	90,5	109,5	130,3	-31,9
Метилхлорид	CH_3Cl	—	-59,5	-92,4	-84,8	-76,0	-70,4	-63,0	-51,2	-38,0	-24,0	-97,7
Метилциклогексан	C_7H_{14}	-35,9	-14,0	-3,2	+8,7	22,0	30,5	42,1	59,6	79,6	100,9	-126,4
Метилциклопентан	C_6H_{12}	-53,7	-33,8	-23,7	-12,8	-0,6	+7,2	17,9	34,0	52,3	71,8	-142,4
Метилциклопропан	C_4H_8	-96,0	-80,6	-72,8	-64,0	-54,2	-48,0	-39,3	-26,0	-11,3	+4,5	—
2-Метил-3-этилпентан	C_8H_{18}	-24,0	-1,8	+9,5	21,7	35,2	43,9	55,7	73,6	94,0	115,6	-114,5
3-Метил-3-этилпентан	C_8H_{18}	-23,9	-1,4	+9,9	22,3	36,2	45,0	57,1	75,3	96,2	118,3	-90,0

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
2-Метоксанилини	C_7H_9NO	61,0	88,0	101,7	116,1	132,0	142,1	155,2	175,3	197,3	218,5	5,2
2-Метоксифенол	$C_7H_8O_2$	52,4	79,1	92,0	106,0	121,6	131,0	144,0	162,7	184,1	205,0	28,3
2-Метоксэтанол	$C_3H_8O_2$	—13,5	+10,2	22,0	34,3	47,8	56,4	68,0	85,3	104,3	124,4	—
Метеоуксусная кислота	$C_7H_6O_3$	52,5	79,3	92,0	106,5	122,0	131,8	144,5	163,5	184,2	204,0	—
Миристиловая кислота	$C_{14}H_{28}O_2$	142,0	174,1	190,8	207,6	223,5	237,2	250,5	272,3	294,6	318,0	57,5
Миристиловый альдегид	$C_{14}H_{26}O$	99,0	132,0	148,3	166,2	186,0	198,3	214,5	240,4	267,9	297,8	23,5
Миристицин	$C_{11}H_{12}O_3$	95,2	126,1	142,0	158,0	177,7	189,5	205,0	228,1	253,5	280,0	—
Мирицен	$C_{10}H_{16}$	14,5	40,0	53,2	67,0	82,6	92,6	106,0	126,0	148,3	171,5	—
Моноизопропиловый эфир тетрапропиленгликоля	$C_{15}H_{32}O_5$	116,6	147,8	163,0	179,8	197,7	209,0	223,3	245,0	268,3	292,7	—
Муравьиная кислота	CH_2O_2	—20,0	—5,0	+2,1	10,3	24,0	32,4	43,8	61,4	80,3	100,6	8,2
Мускон	$C_{16}H_{30}O$	118,0	152,6	170,0	189,8	210,0	223,2	241,5	267,7	297,2	328,0	—
Нафталин	$C_{10}H_8$	52,6	74,2	85,8	101,7	119,3	130,2	145,5	167,7	193,2	217,9	80,2
1-Нафтиламин	$C_{10}H_9N$	104,3	137,7	153,8	171,6	191,5	203,8	220,0	244,9	272,2	300,8	50,0
2-Нафтиламин	$C_{10}H_9N$	108,0	141,6	157,6	175,8	195,7	208,1	224,3	249,7	277,4	306,1	111,5
1-Нафтоиная кислота	$C_{11}H_8O_2$	156,0	184,0	196,8	211,2	225,0	234,5	245,8	263,5	281,4	300,0	160,5
2-Нафтоиная кислота	$C_{11}H_8O_2$	160,8	189,7	202,8	216,9	231,5	241,3	252,7	270,3	289,5	308,5	184,0
1-Нафтол	$C_{10}H_8O$	94,0	125,5	142,0	158,0	177,8	190,0	206,0	229,6	255,8	282,5	—
2-Нафтол	$C_{10}H_8O$	—	128,6	145,5	161,8	181,7	193,7	209,8	234,0	260,6	288,0	122,5
Нерилформиат	$C_{11}H_{18}O_2$	57,3	85,3	99,7	114,8	131,5	142,0	155,6	176,8	200,0	224,5	—
Нерол	$C_{10}H_{18}O$	61,7	90,0	104,0	119,4	136,1	146,3	159,8	181,0	203,5	226,0	—
Никотин	$C_{10}H_{14}N_2$	61,8	91,8	107,2	123,7	142,1	154,7	169,5	193,8	219,8	247,3	—
2-Нитроанилини	$C_6H_6N_2O_2$	104,0	135,7	150,4	167,7	186,0	197,8	213,0	236,3	260,0	284,5P	71,5
3-Нитроанилин	$C_6H_6N_2O_2$	119,3	151,5	167,8	185,5	204,2	216,5	232,1	255,3	280,2	305,7P	114,0
4-Нитроанилин	$C_6H_6N_2O_2$	142,4	177,6	194,4	213,2	234,2	245,9	261,8	284,5P	310,2P	336,0P	146,5
2-Нитробензальдегид	$C_7H_5NO_3$	85,8	117,7	133,4	150,0	168,8	180,7	196,2	220,0	246,8	273,5	40,9
3-Нитробензальдегид	$C_7H_5NO_3$	96,2	127,4	142,8	159,0	177,7	189,5	204,3	227,4	252,1	278,3	58,0
Нитробензол	$C_6H_5NO_2$	44,4	71,6	84,9	99,3	115,4	125,8	139,9	161,2	185,8	210,6	5,7
Нитроглицерин	$C_3H_5N_3O_9$	127	167	188	210	235	251	Вар.	—	—	—	11,0
4-Нитро-1, 3-ксилол	$C_8H_9NO_2$	65,6	95,0	109,8	125,8	143,3	153,8	168,5	191,7	217,5	244,0	2,0
Нитрометан	CH_3NO_2	—29,0	—7,9	+2,8	14,1	27,5	35,5	46,6	63,5	82,0	101,2	—29,0
1-Нитропропан	$C_3H_7NO_2$	—9,6	+13,5	25,3	37,9	51,8	60,5	72,3	90,2	110,6	131,6	—108,0
2-Нитропропан	$C_3H_7NO_2$	—18,8	+4,1	15,8	28,2	41,8	50,3	62,0	80,0	99,8	120,3	—93,0
2-Нитроглюфен	$C_4H_3NO_2S$	48,2	77,7	92,0	108,2	125,8	137,0	151,5	174,0	199,6	224,5	46,0
2-Нитротолуол	$C_7H_7NO_2$	50,0	79,1	93,8	109,6	126,3	137,6	151,5	173,7	197,7	222,3	—4,1
3-Нитротолуол	$C_7H_7NO_2$	50,2	81,0	96,0	112,8	130,7	142,5	156,9	180,3	206,8	231,9	15,5
4-Нитротолуол	$C_7H_7NO_2$	53,7	85,0	100,5	117,7	136,0	147,9	163,0	186,7	212,5	238,3	51,9
2-Нитрофенилацетат	$C_8H_7NO_4$	100,0	128,0	142,0	155,8	172,8	181,7	194,1	213,0	233,5	253,0	—
2-Нитрофенол	$C_6H_5NO_3$	49,3	76,8	90,4	105,8	122,1	132,6	146,4	167,6	191,0	214,5	45,0
Нитроэтан	$C_2H_5NO_2$	—21,0	+1,5	12,5	24,8	38,0	46,5	57,8	74,8	94,0	114,0	—90,0
Нонадекан	$C_{19}H_{40}$	133,2	166,3	183,5	200,8	220,0	232,8	248,0	271,8	299,8	330,0	32,0
Нонакозан	$C_{29}H_{60}$	234,2	269,8	286,4	303,6	323,2	334,8	350,0	373,2	397,2	421,8	63,8
Нонан	C_9H_{20}	2,4	26,3	38,0	51,0	65,6	74,1	86,0	104,7	126,8	149,5	—53,7
1-Нонанол	$C_9H_{20}O$	59,5	86,1	99,7	113,8	129,0	139,0	151,3	170,5	192,1	213,5	—5,0
2-Нонанон	$C_9H_{18}O$	32,1	59,0	72,3	87,2	103,4	113,8	127,4	148,2	171,2	195,0	—19,0
4-Оксибензальдегид	$C_7H_6O_2$	121,2	153,2	169,7	186,8	206,0	217,5	233,5	256,8	282,6	310,0	115,5
α -Оксибутиронитрил	C_5H_9NO	41,0	65,8	77,8	90,7	104,8	113,9	125,0	142,0	159,8	178,8	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										темпера- тура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
α -Окснзюмасляная кис- лота	$C_4H_8O_3$	73,5	98,5	110,5	123,8	138,0	146,4	157,7	175,2	193,8	212,0	79,0
4-Окси-3-метил-2-бутанон	$C_5H_{10}O_2$	44,6	69,3	81,0	94,0	108,2	117,4	129,0	146,5	165,5	185,0	—
4-Окси-4-метил-2-пента- нон	$C_6H_{12}O_2$	22,0	46,7	58,8	72,0	86,7	96,0	108,2	126,8	147,5	167,9	—47,0
3-Оксипропионитрил	C_3H_5NO	58,7	87,8	102,0	117,9	134,1	144,7	157,7	178,0	200,0	221,0	—
Октадекаметилдоктасилок- сан	$C_{18}H_{64}O_7Si_8$	105,8	137,5	152,3	169,2	187,5	199,0	214,5	237,5	263,5	290,0	—
Октадекав	$C_{18}H_{38}$	119,6	152,1	169,6	187,5	207,4	219,7	236,0	260,6	288,0	317,0	28,0
1-Октадеканол	$C_{18}H_{38}O$	150,3	185,6	202,0	220,0	240,4	252,7	269,4	293,5	320,3	349,5	58,5
Октакозан	$C_{28}H_{58}$	226,5	260,3	277,4	295,4	314,2	326,8	341,8	364,8	388,9	412,5	61,6
Октаметилтрисилоксан	$C_8H_{24}O_3Si_3$	7,4	31,5	43,1	56,0	70,0	78,8	91,1	109,2	129,4	150,2	—
Октаметилциклотетра- силоксан	$C_8H_{24}O_4Si_4$	21,7	46,6	59,0	72,4	87,4	96,8	110,0	128,3	149,6	171,2	17,4
Октаи	C_8H_{18}	—14,0	+8,3	19,2	31,5	45,1	53,8	65,7	83,6	104,0	125,6	—56,8
1-Октанол	$C_8H_{18}O$	54,0	76,5	88,3	101,0	115,2	123,8	135,2	152,0	173,8	195,2	—15,4
2-Октанол	$C_8H_{18}O$	32,8	57,6	70,0	83,3	98,0	107,4	119,8	138,0	157,5	178,5	—38,6
2-Октанон	$C_8H_{16}O$	23,6	48,4	60,9	74,3	89,8	99,0	111,7	130,4	151,0	172,9	—16,0
Октилакрилат	$C_{11}H_{20}O_2$	58,5	87,7	102,0	117,8	135,6	145,6	159,1	180,2	204,0	227,0	—
Олеиновая кислота	$C_{18}H_{34}O_2$	176,5	208,5	223,0	240,0	257,2	269,8	286,0	309,8	334,7	360,0P	14,0
Пальмитиновая кислота	$C_{16}H_{32}O_2$	153,6	188,1	205,8	223,8	244,4	256,0	271,5	298,7	326,0	353,8	64,0
Пальмитиновый альдегид	$C_{16}H_{32}O$	121,6	154,6	171,8	190,0	210,0	222,6	239,5	264,1	292,3	321,0	34,0
Пальмитонитрил	$C_{16}H_{31}N$	134,3	168,3	185,8	204,2	223,8	236,6	251,5	277,1	304,5	332,0	31,0
Параформальдегид	$C_6H_{12}O_3$	—9,4	+13,1	24,1	36,1	49,5	57,7	69,0	85,8	104,3	124,0	155±5
Пеларгоновая кислота	$C_9H_{18}O_2$	108,2	126,0	137,4	149,8	163,7	172,3	184,4	203,1	227,5	253,5	—12,5
Пентадекан	$C_{15}H_{32}$	91,6	121,0	135,4	150,2	167,7	178,4	194,0	216,1	242,8	270,5	10,0
1,3-Пентадиен	C_5H_8	—71,8	—53,8	—45,0	—34,8	—23,4	—16,5	—6,7	+8,0	24,7	42,1	—
1,4-Пентадиен	C_5H_8	—83,5	—66,2	—57,1	—47,7	—37,0	—30,0	—20,6	—6,7	+8,3	26,1	—
Пентакозан	$C_{25}H_{52}$	194,2	230,0	248,2	266,1	285,6	298,4	314,0	339,0	365,4	390,3	53,3
Пентан	C_5H_{12}	—76,6	—62,5	—50,1	—40,2	—29,2	—22,2	—12,6	+1,9	18,5	36,1	—129,7
2-Пентаиол	$C_5H_{12}O$	1,5	22,1	32,2	42,6	54,1	61,5	70,7	85,7	102,8	119,7	—
2-Пентанон	$C_5H_{10}O$	—12,0	+8,0	17,9	28,5	39,8	47,3	56,8	71,0	86,3	103,3	—77,8
3-Пентанон	$C_5H_{10}O$	—12,7	+7,5	17,2	27,9	39,4	46,7	56,2	70,6	86,3	102,7	—42,0
2,3,4-Пентантриол	$C_5H_{12}O_3$	155,0	189,3	204,5	220,5	239,6	249,8	263,5	284,5	307,0	327,2	—
Пентахлорбензол	C_6HCl_5	98,6	129,7	144,3	160,0	178,5	190,1	205,5	227,0	251,6	276,0	85,5
Пентахлорфенол	C_6HCl_5O	—	—	—	192,2	211,2	223,4	239,6	261,8	285,0	309,3P	188,5
Пентахлорэтан	C_2HCl_5	1,0	27,2	39,8	53,9	69,9	80,0	93,5	114,0	137,2	160,5	—22,0
Пентахлорэтилбензол	$C_8H_5Cl_5$	96,2	130,0	148,0	166,0	186,2	199,0	216,0	241,8	269,3	299,0	—
Пентаэтилбензол	$C_{16}H_{26}$	86,0	120,0	135,8	152,4	171,9	184,2	200,0	224,1	250,2	277,0	—
Пентаэтилхлорбензол	$C_{16}H_{25}Cl$	90,0	123,8	140,7	158,1	178,2	191,0	208,0	230,3	257,2	285,0	—
1-Пентен	C_5H_{10}	—80,4	—53,3	—54,5	—46,0	—34,1	—27,1	—17,7	—3,4	+12,8	30,1	—
Пивалофенон	$C_{11}H_{14}O$	57,8	85,7	99,0	114,3	130,4	140,8	154,0	175,0	197,7	220,0	—
2-Пиколлин	C_6H_7N	—11,1	+12,6	24,4	37,4	51,2	59,9	71,4	89,0	108,4	128,8	—70,0
Пимелиновая кислота	$C_7H_{12}O_4$	163,4	196,2	212,0	229,3	247,0	258,2	272,0	294,5	318,5	342,1	103,0
α -Пинен	$C_{10}H_{16}$	—1,0	+24,6	37,3	51,4	66,8	76,8	90,1	110,2	132,3	155,0	—55,0
β -Пинен	$C_{10}H_{16}$	4,2	30,0	42,3	58,1	71,5	81,2	94,0	114,1	136,1	158,3	—
Пиперидин	$C_5H_{11}N$	—	—7,0	+3,9	15,8	29,2	37,7	49,0	66,2	85,7	106,0	—9,0
Пиридин	C_5H_5N	—18,9	+2,5	13,2	24,8	38,0	46,8	57,8	75,0	95,6	115,4	—42,0

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Пировиноградный ангидрид	$C_5H_6O_8$	69,7	99,7	114,2	130,0	147,8	158,0	173,8	196,1	221,0	247,4	—
Пирогаллол	$C_6H_6O_3$	—	151,7	167,7	185,3	204,2	216,3	232,0	255,3	281,5	309,0 P	133,0
Пирокатехин	$C_6H_6O_2$	—	104,0	118,3	134,0	150,6	161,7	176,0	197,7	221,5	245,5	105,0
Пробковая кислота	$C_8H_{14}O_4$	172,8	205,5	219,5	283,2	254,6	265,4	279,0	300,5	322,8	345,5	142,0
Пропан	C_3H_8	—128,9	—115,4	—108,5	—100,9	—92,4	—87,0	—79,6	—68,4	—55,6	—42,1	—187,1
1,2-Пропандиол	$C_3H_8O_2$	45,5	70,8	83,2	96,4	111,2	119,9	132,0	149,7	168,1	188,2	—
1,3-Пропандиол	$C_3H_8O_2$	59,4	87,2	100,6	115,5	131,0	141,1	153,4	172,8	193,8	214,2	—
1-Пропанол	C_3H_8O	—15,0	+5,0	14,7	25,3	36,4	43,5	52,8	66,8	82,0	97,8	—127,0
2-Пропанол	C_3H_8O	—26,1	—7,0	+2,4	12,7	23,8	30,5	39,5	53,0	67,8	82,5	—85,8
Пропенилбензол	C_9H_{10}	17,5	43,8	57,0	71,5	87,7	97,8	111,7	132,0	154,7	179,0	—30,1
Пропиламин	C_3H_9N	—64,4	—46,3	—37,2	—27,1	—16,0	—9,0	+0,5	15,0	31,5	48,5	—83,0
Пропилацетат	$C_5H_{10}O_2$	—26,7	—5,4	+5,0	16,0	28,8	37,0	47,8	64,0	82,0	101,8	—92,5
Пропилбензоат	$C_{10}H_{12}O_2$	54,6	83,8	98,0	114,3	131,8	143,3	157,4	180,1	205,2	231,0	—51,6
Пропилбензол	C_9H_{12}	6,3	31,3	43,4	56,8	71,6	81,1	94,0	113,5	135,7	159,2	—99,5
Пропибутират	$C_7H_{14}O_2$	—1,6	+22,1	34,0	47,0	61,5	70,3	82,6	101,0	121,7	142,7	—95,2
Пропилен	C_3H_6	—131,9	—120,7	—49,0	—104,7	—96,5	—91,3	—84,1	—73,3	—60,9	—47,7	—185,0
Пропилен окись	C_3H_6O	—75,0	—57,8	—112,1	—39,3	—28,4	—21,3	—12,0	+2,1	17,8	34,5	—112,1
Пропиловалерат	$C_6H_{12}O_2$	8,0	32,8	45,1	58,0	72,8	82,3	95,0	113,9	135,0	155,9	—
Пропилкарбамат	$C_4H_9NO_2$	52,4	77,6	90,0	103,2	117,7	126,5	138,3	155,8	175,8	195,0	—
Пропиллевулинат	$C_8H_{14}O_3$	59,7	86,3	99,9	114,0	130,1	140,6	154,0	175,6	198,0	221,2	—
Пропилмеркаптан	C_3H_8S	—56,0	—36,3	—26,3	—15,4	—3,2	+4,6	15,3	31,5	49,2	67,4	—112,0
Пропилпропионат	$C_6H_{12}O_2$	—14,2	+8,0	19,4	31,6	45,0	53,8	65,2	82,7	102,0	122,4	—76,0
Пропилформиат	$C_4H_8O_2$	—43,0	—22,7	—12,6	—1,7	+10,8	18,8	29,5	45,3	62,6	81,3	—92,9
Пропилхлорглюксилат	$C_5H_7ClO_3$	9,7	32,3	43,5	55,6	68,8	77,2	88,0	104,7	123,0	150,0	—
Пропионамид	C_5H_7NO	65,0	91,0	105,0	119,0	134,8	144,3	156,0	174,2	194,0	213,0	79,0
1-Пропионафтон	$C_{13}H_{12}O$	124,0	155,5	171,0	188,1	206,9	218,2	233,5	255,5	280,2	306,0	—
Пропионитрил	C_5H_5N	—35,0	—13,6	—3,0	+8,8	22,0	30,1	41,4	58,2	77,7	97,1	—91,9
Пропионовая кислота	$C_3H_6O_2$	4,6	28,0	39,7	52,0	65,8	74,1	85,8	102,5	122,0	141,1	—22,0
Пропионовый ангидрид	$C_6H_{10}O_3$	20,6	45,3	57,7	70,4	85,6	94,5	107,2	127,8	146,0	167,0	—45,0
Пропиофенон	$C_9H_{10}O$	50,0	77,9	92,2	107,6	124,3	135,0	149,3	170,2	194,2	218,0	21,0
Пулегон	$C_{10}H_{16}O$	58,3	82,5	94,0	106,8	121,7	130,2	143,1	162,5	189,8	221,0	—
Резорцин	$C_6H_6O_2$	108,4	138,0	152,1	168,0	185,3	195,8	209,8	230,8	253,4	276,5	110,7
Салициловая кислота	$C_7H_6O_3$	113,7	136,0	146,2	156,8	172,2	182,0	193,4	210,0	230,5	256,0	159,0
Салициловый альдегид	$C_7H_6O_2$	33,0	60,1	73,8	88,7	105,2	115,7	129,4	150,0	173,7	196,5	—7,0
Салол	$C_{13}H_{10}O_3$	117,8	150,7	167,0	185,6	205,0	217,2	233,8	257,8	284,8	313,0	42,5
Сафрол	$C_{10}H_{10}O_2$	63,8	93,0	107,6	123,0	140,1	150,3	165,1	186,2	210,0	233,0	11,2
Себациновая кислота	$C_{10}H_{18}O_4$	183,0	215,7	232,0	250,0	268,2	279,8	294,5	313,2	332,8	352,3 P	134,5
Селенофен	C_6H_4Se	—39,0	—16,0	—4,0	+9,1	24,1	33,8	47,0	66,7	88,8	114,3	—
Сероселенуглерод	$CSSe$	—47,3	—26,5	—16,0	—4,4	+8,6	17,0	28,3	45,7	65,2	85,6	—75,2
Сероуглерод	CS_2	—73,8	—54,3	—44,7	—34,3	—22,5	—15,3	—5,1	+10,4	28,0	46,5	—110,8
Синильная кислота	HCN	—70,8	—55,6	—48,2	—40,3	—31,3	—25,8	—18,8	—5,9	+9,8	25,8	—14,0
Скатол	C_9H_9N	95,0	124,2	139,6	154,3	171,9	183,6	197,4	218,8	242,5	266,2	95,0
Сукцинамид	$C_4H_5NO_2$	115,0	143,2	157,0	174,0	192,0	203,0	217,4	240,0	263,5	287,5	125,5
Сукцилхлорид	$C_4H_4Cl_2O_2$	39,0	65,0	78,0	91,8	107,5	117,2	130,0	149,3	170,0	192,5	17,0
Стеариновая кислота	$C_{18}H_{36}O_2$	173,7	209,0	225,0	243,4	263,3	275,5	291,0	316,5	343,0	370,0 P	69,3
Стеариновый альдегид	$C_{18}H_{36}O$	140,0	174,6	192,1	210,6	230,8	244,2	260,0	285,0	313,8	342,5	63,5

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Стирол	C_8H_8	-7,0	+18,0	30,8	44,6	59,8	69,5	82,0P	101,3P	122,5P	145,2P	-30,6
α -Терпинеол	$C_{10}H_{18}O$	52,8	80,4	94,3	109,8	126,0	136,3	150,1	171,2	194,3	217,5	35,0
Терпинолен	$C_{10}H_{16}$	32,3	58,0	70,6	84,8	100,0	109,8	122,7	142,0	163,5	185,0	—
1,1,1,2-Тетрабромэтан	$C_2H_2Br_4$	58,0	83,3	95,7	108,5	123,2	132,0	144,0	161,5	181,0	200,0	—
1,1,2,2-Тетрабромэтан	$C_2H_2Br_4$	65,0	95,5	110,0	126,0	144,0	155,1	170,0	192,5	217,5	243,5	—
Тетрадекаметилгексасилоксан	$C_{14}H_{42}O_7Si_6$	73,7	102,6	117,6	132,8	149,8	160,0	175,2	196,5	220,5	245,5	—
Тетрадекаметилциклопентасилоксан	$C_{14}H_{42}O_7Si_7$	86,3	116,3	131,5	147,5	165,3	176,5	191,8	214,5	239,2	264,0	-32,0
Тетрадекан	$C_{14}H_{30}$	76,4	106,0	120,7	135,6	152,7	164,0	178,5	201,8	226,8	252,5	5,5
2-Тетрадеканон	$C_{14}H_{28}O$	99,3	130,0	145,5	161,3	179,8	191,4	206,0	228,2	253,3	278,0	—
Тетрадециламин	$C_{14}H_{31}N$	102,6	135,8	152,0	170,0	189,0	200,2	215,7	239,8	264,6	291,2	—
Тетрадецилтриметилсилан	$C_{17}H_{36}Si$	120,0	150,7	166,2	183,5	201,5	213,3	227,8	250,0	275,0	300,0	—
Тетранзобутилен	$C_{16}H_{32}$	63,8	93,7	108,5	124,5	142,2	152,6	167,5	190,0	214,6	240,0	—
Тетракозаметилундекасиллоксан	$C_{24}H_{72}O_{10}Si_{11}$	175,2	203,5	216,7	230,5	246,2	254,8	266,3	284,0	303,7	322,8	—
Тетракозан	$C_{24}H_{50}$	183,8	219,6	237,6	255,3	276,3	288,4	305,2	330,3	358,0	386,4	51,1
Тетралин	$C_{10}H_{12}$	38,0	65,3	79,0	93,8	110,4	121,3	135,3	157,2	181,8	207,2	-31,0
1,2,3,4-Тетраметилбензол	$C_{10}H_{14}$	42,6	68,7	81,8	95,8	111,5	121,8	135,7	155,7	180,0	204,4	-4,0
1,2,3,5-Тетраметилбензол	$C_{10}H_{14}$	40,6	65,8	77,8	91,0	105,8	115,4	128,3	149,9	173,7	197,9	-24,0
1,2,4,5-Тетраметилбензол	$C_{10}H_{14}$	45,0	65,0	74,6	88,0	104,2	114,8	128,1	149,5	172,1	195,9	79,5
Тетраметилбор	$C_4H_{14}B_2$	-59,6	-38,1	-27,4	-16,1	-3,4	+4,6	15,3	31,6	49,8	68,6	-72,5
2,2,3,3-Тетраметилбутан	C_8H_{18}	-17,4	+3,2	13,5	24,6	36,8	44,5	54,8	70,2	87,4	106,3	-102,2
Тетраметилолово	$C_4H_{12}Sn$	-51,3	-31,0	-20,6	-9,3	+3,5	11,7	22,8	39,8	58,5	78,0	—
Тетраметилпиперазин	$C_8H_{18}N_2$	23,7	48,8	61,7	75,6	90,0	100,0	113,8	134,3	157,8	183,5	—
Тетраметилсвинец	$C_4H_{12}Pb$	-29,0	-6,8	+4,4	16,6	30,3	39,2	50,8	68,8	89,0	110,0	-27,5
Тетраметилсилан	$C_4H_{12}Si$	-83,8	-66,7	-58,0	-48,3	-37,4	-30,3	-20,9	-6,5	+10,0	27,0	-102,1
Тетранитрометан	CH_4O_8	—	—	22,7	35,2	48,4	57,3	68,9	86,0	105,9	125,7P	13,0
Тетрахлоранил	$C_6Cl_4O_2$	70,7	89,3	97,8	106,4	116,1	122,0	129,5	140,3	151,3	162,6	290
1,2,3,4-Тетрахлорбензол	$C_6H_2Cl_4$	68,5	99,6	114,7	131,2	149,2	160,0	175,7	198,0	225,5	254,0	46,5
1,2,3,5-Тетрахлорбензол	$C_6H_2Cl_4$	58,2	89,0	104,1	121,6	140,0	152,0	168,0	193,7	220,0	246,0	54,5
1,2,4,5-Тетрахлорбензол	$C_6H_2Cl_4$	—	—	—	—	146,0	157,7	173,5	196,0	220,5	245,0	139
1,1,2,2-Тетрахлор-1,2-дифторэтан	$C_2Cl_4F_2$	-37,5	-16,0	-5,0	+6,7	19,8	28,1	38,6	55,0	73,1	92,0	26,5
3,4,5,6-Тетрахлор-1,2-ксилол	$C_8H_6Cl_4$	94,4	125,0	140,3	156,0	174,2	185,8	200,5	223,0	248,3	273,5	—
Тетрахлорсилан [60]	$SiCl_4$	—	—	-35,1	-24,4	-12,6	-5,0	+5,3	20,9	38,6	57,3	—
2- α , α , α -Тетрахлортолуол	$C_7H_4Cl_4$	69,0	101,8	117,9	135,8	155,0	167,8	185,0	208,0	238,0	262,1	28,7
2,3,4,6-Тетрахлорфенол	$C_6H_2Cl_4O$	100,0	130,3	145,3	161,0	179,1	190,0	205,2	227,2	250,4	275,0	69,5
1,1,1,2-Тетрахлорэтан	$C_2H_2Cl_4$	-16,3	+7,4	19,3	32,1	46,7	56,0	68,0	87,2	108,2	130,5	-68,7
1,1,2,2-Тетрахлорэтан	$C_2H_2Cl_4$	-3,8	+20,7	33,0	46,2	60,8	70,0	83,2	102,2	124,0	145,9	-36
1,2,3,5-Тетрахлор-4-этилбензол	$C_8H_6Cl_4$	77,0	110,0	126,0	143,7	162,1	175,0	191,6	215,3	243,0	270,0	—
Тетрахлорэтилен	C_2Cl_4	-20,6	+2,4	13,8	26,3	40,1	49,2	61,3	79,8	100,0	120,8	-19,0
1,2,3,4-Тетраэтилбензол	$C_{14}H_{22}$	65,7	96,2	111,6	127,7	145,8	156,7	172,4	196,0	221,4	248,0	11,6
Тетраэтилдистибин	$C_8H_{20}Sb_2$	97,0	133,5	151,2	171,0	193,2	207,3	225,6	254,3	286,2	320,3	—
Тетраэтиленгликоль	$C_8H_{18}O_5$	153,9	183,7	197,1	212,3	228,0	237,8	250,0	268,4	288,0	307,8	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Тетраэтиленгликольхлор-гидрин	$C_8H_{17}ClO_4$	110,1	141,8	156,1	172,6	190,0	200,5	214,8	236,5	258,2	281,5	—
Тетраэтилсвинец	$C_8H_{20}Pb$	38,4	63,6	74,8	88,0	102,4	111,7	123,8	142,0	161,8	183,0	—136,0
Тетраэтилсилан	$C_8H_{20}Si$	—1,0	+23,9	36,3	50,0	65,3	74,8	88,0	108,0	130,2	153,0	—
Тетраэтоксисилан	$C_8H_{20}O_4Si$	16,0	40,3	52,6	65,8	81,1	90,7	103,6	123,5	146,2	168,5	—
Тиглиновый альдегид	C_5H_8O	—25,0	—1,6	+10,0	23,2	37,0	45,8	57,7	75,4	95,5	116,4	—
Тимол	$C_{10}H_{14}O$	64,3	92,8	107,4	122,6	139,8	149,8	164,1	185,5	209,2	231,8	51,5
2,2'-Тиодизтанол	$C_4H_{10}O_2S$	42,0	96,0	128,0	165,0	210,0P	240,5P	285,0P	—	—	—	—
Тиофен	C_4H_4S	—40,7	—20,8	—10,9	0,0	+12,5	20,1	30,5	46,5	64,7	84,4	—38,3
4-Толилгидразин	$C_7H_{10}N_2$	82,0	110,0	123,8	138,6	154,1	165,0	178,0	198,0	219,5	242,0	65,5
2-Толилизотионид	C_8H_7N	25,2	51,0	64,0	78,2	94,0	104,0	117,7	137,8	159,9	183,5	—
2-Толуидин	C_7H_9N	44,0	69,3	81,4	95,1	110,0	119,8	133,0	153,0	176,2	199,7	—16,3
3-Толуидин	C_7H_9N	41,0	68,0	82,0	96,7	113,5	123,8	136,7	157,6	180,6	203,3	—31,5
4-Толуидин	C_7H_9N	42,0	68,2	81,8	95,8	111,5	121,5	133,7	154,0	176,9	200,4	44,5
2-Толунитрил	C_8H_7N	36,7	64,0	77,9	93,0	110,0	120,8	135,0	156,0	180,0	205,2	—13,0
4-Толунитрил	C_8H_7N	42,5	71,3	85,8	101,7	109,5	130,0	145,2	167,3	193,0	217,6	29,5
Толуол	C_7H_8	—26,7	—4,4	+6,4	18,4	31,8	40,3	51,9	69,5	89,5	110,6	—95,0
Толуол-2,4-диамин	$C_7H_{10}N_2$	106,5	137,2	151,7	167,9	185,7	196,2	211,5	232,8	256,0	280,0	99,0
Трибромцетальдегид	C_3HBr_3O	18,5	45,0	58,0	72,1	87,8	97,5	110,2	130,0	151,6	174,0P	—
1,1,2-Трибромбутан	$C_4H_7Br_3$	45,0	73,5	87,8	103,2	120,2	131,6	146,0	167,8	192,0	216,2	—
1,2,2-Трибромбутан	$C_4H_7Br_3$	41,0	69,0	83,2	98,0	116,0	127,0	141,8	163,5	188,0	213,8	—
2,2,3-Трибромбутан	$C_4H_7Br_3$	38,2	66,0	79,8	94,6	111,8	122,2	136,3	157,8	182,2	206,5	—
Трибромметан	$CHBr_3$	—	22,0	34,0	48,0	63,6	73,4	85,9	106,1	127,9	150,5	8,5
1,2,3-Трибромпропан	$C_3H_5Br_3$	47,5	75,8	90,0	105,8	122,8	134,0	148,0	170,0	195,0	220,0	16,5
1,1,2-Трибромэтан	$C_2H_3Br_3$	32,6	58,0	70,6	84,2	100,0	110,0	123,5	143,5	165,4	188,4	—26,0
2,4,6-Три- <i>трет</i> -бутил-фенол	$C_{18}H_{30}O$	95,2	126,1	142,0	158,0	177,4	188,0	203,0	226,2	250,6	276,3	—
Тридекан	$C_{13}H_{28}$	59,4	98,3	104,0	120,2	137,7	148,2	162,5	185,0	209,4	234,0	—6,2
Тридекановая кислота	$C_{13}H_{26}O_2$	137,8	166,3	181,0	195,8	212,4	222,0	236,0	255,2	276,5	299,0	41,0
2-Тридеканон	$C_{13}H_{26}O$	86,8	117,0	131,8	147,8	165,7	176,6	191,5	214,0	238,3	262,5	28,5
Триизобутиламин	$C_{12}H_{27}N$	32,3	57,4	69,8	83,0	97,8	107,3	119,7	138,0	157,8	179,0	—22,0
Триизобутилен	$C_{12}H_{24}$	18,0	44,0	56,5	70,0	86,7	96,7	110,0	130,2	153,0	179,0	—
Трикозан	$C_{23}H_{48}$	170,0	206,3	223,0	242,0	261,3	273,8	289,8	313,5	339,8	366,5	47,7
Триметаллилфосфат	$C_{19}H_{21}PO_4$	93,7	131,0	149,8	169,8	192,0	207,0	225,8	255,0	288,5	324,0	—
Триметиламин	C_3H_9N	—97,1	—81,7	—73,8	—65,0	—55,2	—48,8	—40,3	—27,0	—12,5	+2,9	—117,1
2,4,5-Триметиланилин	$C_9H_{13}N$	68,4	95,9	109,0	123,7	139,8	149,5	162,0	182,3	203,7	234,5	67,0
2,3,5-Триметилацетофенон	$C_{11}H_{14}O$	79,0	108,0	122,3	137,5	154,2	165,7	179,7	201,3	224,3	247,5	—
1,2,3-Триметилбензол	C_9H_{12}	16,8	42,9	55,9	69,9	85,4	95,3	108,8	129,0	152,0	176,1	—25,5
1,2,4-Триметилбензол	C_9H_{12}	13,6	38,4	50,7	64,5	79,8	89,5	102,8	122,7	145,4	169,2	—44,1
1,3,5-Триметилбензол	C_9H_{12}	9,6	34,7	47,4	61,0	76,1	85,8	98,9	118,6	141,0	164,7	—44,8
Триметилбор	C_3H_9B	—118,0	—99,6	—92,4	—84,0	—74,7	—68,9	—60,8	—48,5	—34,7	—20,1	—
2,2,3-Триметилбутан	C_7H_{16}	—	—	—18,8	—7,5	+5,2	13,3	24,4	41,2	60,4	80,9	—25,0
Триметилгаллий	C_3H_9Ga	—62,3	—42,0	—31,7	—20,3	—9,0	—1,6	+8,0	23,0	39,0	55,6	—19
Триметилдиборан	$C_3H_{12}B_2$	—74,0	—54,7	—44,8	—33,9	—22,0	—14,7	—4,4	+10,8	27,8	45,5	—122,9
Триметилоттилсилан	$C_{11}H_{26}Si$	41,8	68,8	82,3	96,6	113,0	123,2	136,5	156,0	179,5	202,0	—
2,2,3-Триметилпентан	C_8H_{18}	—29,0	—7,1	+3,9	16,0	29,5	38,1	49,9	67,8	88,2	109,8	—112,3

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
2,2,4-Триметилпентан	C_8H_{18}	-36,5	-15,0	-4,3	+7,5	20,7	29,1	40,7	58,1	78,0	99,2	-107,3
2,3,3-Триметилпентан	C_8H_{18}	-25,8	-3,9	+0,9	19,2	33,0	41,8	53,8	72,0	92,7	114,8	-101,5
2,3,4-Триметилпентан	C_8H_{18}	-26,3	-4,1	+7,1	19,3	32,9	41,6	53,4	71,3	91,8	113,5	-109,2
2,2,4-Триметил-2-пентанон	$C_8H_{16}O$	14,7	36,0	46,4	57,6	69,8	77,3	87,6	102,2	118,4	135,0	—
Триметилпропилолово	$C_8H_{16}Sn$	-12,0	+10,7	21,8	34,0	48,5	57,5	69,8	88,0	109,6	131,7	—
Триметилпропилсилан	$C_8H_{16}Si$	-46,0	-24,7	-13,9	-2,1	+11,3	19,9	31,6	49,0	69,2	90,0	—
2,4,5-Триметилстирол	$C_{11}H_{14}$	48,1	71,0	91,6	107,1	124,2	135,5	149,8	171,8	196,1	221,2P	—
2,4,6-Триметилстирол	$C_{11}H_{14}$	37,5	65,7	79,7	94,8	111,8	122,3	136,8	157,8	182,3	207,0P	—
Триметилфосфат	$C_3H_7O_4P$	26,0	53,7	67,8	83,0	100,0	110,0	124,0	145,0	167,8	192,7	—
Триметилхлорсилан [60]	C_3H_9ClSi	—	—	-34,9	-24,2	-12,3	-4,7	+5,6	21,2	38,9	57,6	—
Триметилцитрат	$C_9H_{14}O_7$	106,2	146,2	160,4	177,2	194,2	205,5	219,6	241,3	264,2	287,0P	78,5
1,2,4-Триметил-5-этилбензол	$C_{11}H_{16}$	43,7	71,2	84,6	99,7	106,0	126,3	140,3	160,3	184,5	208,1	—
1,3,5-Триметил-2-этилбензол	$C_{11}H_{16}$	38,8	67,0	80,5	96,0	113,2	123,8	137,9	158,4	183,5	208,0	—
Триметилантарный ангидрид	$C_7H_{10}O_8$	53,5	82,6	97,4	113,8	131,0	142,2	156,5	173,8	205,5	231,0	—
Трипропиленгликоль	$C_9H_{20}O_4$	96,0	125,7	140,5	155,8	173,7	184,6	199,0	220,2	244,3	267,2	—
Трипропиленгликоль, монобутиловый эфир	$C_{13}H_{28}O_4$	101,5	131,6	147,0	161,8	179,8	190,2	204,4	224,4	247,0	269,5	—
Трипропиленгликоль, моноизопропиловый эфир	$C_{12}H_{26}O_4$	82,4	112,4	127,3	143,7	161,4	173,2	187,8	209,7	232,8	256,6	—
Триглицерофосфат	$C_{21}H_{42}O_4P$	154,6	184,2	198,0	213,2	229,7	239,8	252,2	271,8	292,7	313,0	—
Трифенилметан	$C_{19}H_{16}$	169,7	188,4	197,0	206,8	215,5	221,2	228,4	239,7	249,8	259,2	93,4
Трифенилфосфат	$C_{19}H_{16}O_4P$	193,5	230,4	249,8	269,7	290,3	305,2	322,5	349,8	379,2	413,5	49,4
α, α, α -Трифтортолуол	$C_7H_5F_3$	-32,0	-10,3	+0,4	12,2	25,7	34,0	45,3	62,5	82,0	102,2	-29,3
Трифторфенилсилан	$C_6H_5F_3Si$	-31,0	-9,7	+0,8	12,3	25,4	33,2	44,2	60,1	78,7	98,3	—
2,4,6-Трихлоранилин	$C_6H_3Cl_3N$	134,0	157,8	170,0	182,6	195,8	204,5	214,6	229,8	246,4	262,0	78,0
Трихлорацетальдегид	C_2HCl_3O	-37,8	-16,0	-5,0	+7,2	20,2	29,1	40,2	57,8	77,5	97,7	-57
Трихлорацетилбромид	C_2BrCl_3O	-7,4	+16,7	29,3	42,1	57,2	66,7	79,5	98,4	120,2	143,0	—
1,2,3-Трихлорбензол	$C_6H_3Cl_3$	40,0	70,0	85,6	101,8	119,8	131,5	146,0	168,2	193,5	218,5	52,5
1,2,4-Трихлорбензол	$C_6H_3Cl_3$	38,4	67,3	81,7	97,2	114,8	125,7	140,0	162,0	187,7	213,0	17
1,3,5-Трихлорбензол	$C_6H_3Cl_3$	—	63,8	78,0	93,7	110,8	121,8	136,0	157,7	183,0	208,4	63,5
1,2,3-Трихлорбутан	$C_4H_7Cl_3$	0,5	27,2	40,0	55,0	71,5	82,0	96,2	118,0	143,0	169,0	—
Трихлоризопропилсилан	$C_3H_7Cl_3Si$	-24,3	-1,5	+9,9	22,5	36,5	45,7	57,8	75,8	96,8	118,5	—
Трихлорметан	$CHCl_3$	-58,0	-39,1	-29,7	-19,0	-7,1	+0,5	10,4	25,9	42,7	61,3	-63,5
Трихлорметилсилан	CH_3Cl_3Si	-60,8	-40,7	-30,7	-19,3	-7,0	+1,0	12,1	28,1	47,0	66,4	-90
1,1,1-Трихлорпропан	$C_3H_5Cl_3$	-28,8	-7,0	+4,2	16,2	29,9	38,3	50,0	67,7	87,5	108,2	-77,7
1,2,3-Трихлорпропан	$C_3H_5Cl_3$	9,0	33,7	46,0	59,3	74,0	83,6	96,1	115,6	137,0	158,0	14,7
Трихлорсилан [60]	$SiHCl_3$	—	—	-53,9	-43,9	-32,9	-25,8	-16,2	-1,8	+14,6	31,9	—
α, α, α -Трихлортолуол	$C_7H_5Cl_3$	45,8	73,7	87,6	102,7	119,8	130,0	144,3	165,6	189,2	213,5	-21,2
1,1,2-Трихлор-1,2,2-трифторэтан	$C_2Cl_3F_3$	-68,0	-49,4	-40,3	-30,0	-18,5	-11,2	-1,7	+13,5	30,2	47,6	-35
Трихлоруксусная кислота	$C_2HCl_3O_2$	51,0	76,0	88,2	101,8	116,3	125,9	137,8	155,4	175,2	195,6	57
Трихлоруксусный ангидрид	$C_4Cl_6O_3$	56,2	85,3	99,6	114,3	131,2	141,8	155,2	176,2	199,8	223,0	—
Трихлорфенилсилан	$C_6H_5Cl_3Si$	33,0	60,4	74,2	89,5	105,8	116,3	130,5	151,3	175,7	201,0	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Три-2-хлорфенилтиофосфат	$C_{18}H_{12}Cl_3O_3PS$	188,2	217,2	231,2	246,7	261,7	271,5	283,8	302,8	322,0	341,3	—
2,4,5-Трихлорфенол	$C_6H_3Cl_3O$	72,0	102,1	117,3	134,0	151,5	162,5	178,0	201,5	226,5	251,8	62
2,4,6-Трихлорфенол	$C_6H_3Cl_3O$	76,5	105,9	120,2	135,8	152,2	163,5	177,8	199,0	222,5	246,0	68,5
Трихлорформетан	CCl_3F	—84,3	—67,6	—59,0	—49,7	—39,0	—32,3	—23,0	—9,1	+6,8	23,7	—
1,1,1-Трихлорэтан	$C_2H_3Cl_3$	—52,0	—32,0	—21,9	—10,8	+1,6	9,5	20,0	36,2	54,6	74,1	—30,6
1,1,2-Трихлорэтан	$C_2H_3Cl_3$	—24,0	—2,0	+8,3	21,6	35,2	44,0	55,7	73,3	93,0	113,9	—36,7
Трихлорэтилен	C_2HCl_3	—43,8	—22,8	—12,4	—1,0	+11,9	20,0	31,4	48,0	67,0	86,7	—73
Трихлорэтилсилан	$C_2H_5Cl_3Si$	—27,9	—6,8	+3,6	15,2	27,9	35,7	46,3	62,2	80,3	99,5	—40
Трихлорэтоксисилан	$C_2H_5Cl_3OSi$	—32,4	—10,9	0,0	+12,1	25,3	33,8	45,2	62,3	82,2	102,4	—
1,2,4-Триэтилбензол	$C_{12}H_{18}$	46,0	74,2	88,5	104,0	121,7	132,2	146,8	168,3	193,7	218,0	—
1,3,4-Триэтилбензол	$C_{12}H_{18}$	47,9	76,0	90,2	105,8	122,6	133,4	147,7	168,3	193,2	217,5	—
Триэтилгексилсилан	$C_{12}H_{26}Si$	52,4	81,8	96,4	112,3	130,0	141,7	156,0	179,0	204,6	230,0	—
Триэтилгептилсилан	$C_{13}H_{26}Si$	70,0	99,8	114,6	130,3	148,0	158,2	174,0	196,0	221,0	247,0	—
Триэтиленбор	$C_6H_{15}B$	—	—	—148,0	—140,6	—131,4	—125,2	—116,0	—101,0	—81,0	—56,2	—
Триэтиленгликоль	$C_6H_{14}O_4$	114,0	144,0	158,1	174,0	191,3	201,5	214,6	235,2	256,6	278,3	—
Триэтилкамфоронат	$C_{26}H_{40}O_6$	—	150,2	166,0	183,6	201,8	213,5	228,6	250,8	276,0	301,0	135,0
Триэтилметилсилан	$C_7H_{16}Si$	—18,2	+5,2	16,6	29,8	44,0	53,2	65,6	84,0	105,3	127,0	—
Триэтилоктилсилан	$C_{14}H_{28}Si$	73,7	104,8	120,6	137,7	155,7	168,0	184,3	208,0	235,0	262,0	—
Триэтилпропилсилан	$C_9H_{22}Si$	15,2	40,8	54,0	68,0	83,7	93,8	107,4	127,0	149,8	173,0	—
Триэтилталлий	$C_6H_{15}Pb$	9,3	37,6	51,7	67,7	85,4	95,7	112,1	136,0	163,5	192,1P	—63,0
Триэтилортоформат	$C_7H_{16}O_3$	5,5	29,2	40,5	53,4	67,5	76,0	88,0	106,0	125,7	146,0	—
Триэтилфосфат	$C_6H_{15}O_4P$	39,6	67,8	82,1	97,8	115,7	126,3	141,6	163,7	187,0	211,0	—
Триэтилцитрат	$C_{12}H_{20}O_7$	107,0	138,7	144,0	171,1	190,4	202,5	217,8	242,2	267,5	294,0	—
Триэтоксиметилсилан	$C_7H_{18}O_3Si$	—1,5	+22,8	34,6	47,2	61,7	70,4	82,7	101,0	121,8	143,5	—
Триэтоксифенилсилан	$C_{12}H_{20}O_3Si$	71,0	98,8	112,6	127,2	143,5	153,2	167,5	188,0	210,5	233,5	—
α -Туйон	$C_{10}H_{16}O$	38,3	65,7	79,3	93,7	110,0	120,2	134,0	154,2	177,8	201,0	—
Углерода двуокись	CO_2	—134,3	—124,4	—119,5	—114,4	—108,6	—104,8	—100,2	—93,0	—85,7	—78,2	—57,5
» недоокись	CO_2	—94,8	—79,0	—71,0	—62,2	—52,0	—45,5	—36,9	—23,3	—8,9	+6,3	—107
» окись	C_3O_2	—222,0	—217,2	—215,0	—212,8	—210,0	—208,1	—205,7	—201,3	—196,3	—191,3	—205,0
» сероокись	COS	—132,4	—119,8	—113,3	—106,0	—98,3	—93,0	—85,9	—75,0	—62,7	—49,9	—138,8
Углерод подсернистый	C_5S_2	14,0	41,2	54,9	69,3	85,6	96,0	109,9	130,8	—	—	+0,4
» четырехбромистый	CBr_4	—	—	—	—	96,3	106,3	119,7	139,7	163,8	189,5	90,1
» четырехфтористый	CF_4	—184,6	—174,1	—169,3	—164,3	—158,8	—155,4	—150,7	—143,6	—135,5	—127,7	—183,7
» четыреххлористый	CCl_4	—50,0	—30,0	—19,6	—8,2	+4,3	12,3	23,0	38,3	57,8	76,7	—22,6
Уксусная кислота	$C_2H_4O_2$	—17,2	+6,3	17,5	29,9	43,0	51,7	63,0	80,0	99,0	118,1	16,7
Уксусный ангидрид	$C_4H_6O_3$	1,7	24,8	36,0	48,3	62,1	70,8	82,2	100,0	119,8	139,6	—73
Ундекан	$C_{11}H_{24}$	31,4	58,4	72,2	86,3	103,1	113,9	126,8	148,0	170,6	194,5	—25,6
Ундекановая кислота	$C_{11}H_{22}O_2$	101,4	133,1	149,0	166,0	185,6	197,2	212,5	237,8	262,8	290,0	29,5
Ундекан-2-ол	$C_{11}H_{24}O$	71,1	99,0	112,8	127,5	143,7	153,7	167,2	187,7	209,8	232,0	—
Ундекан-2-он	$C_{11}H_{22}O$	68,1	95,5	108,9	123,1	139,0	148,6	161,0	181,2	202,3	224,0	15,0
10-Ундеценная кислота	$C_{11}H_{20}O_2$	114,0	142,8	156,3	172,0	188,7	199,5	213,5	232,8	254,0	275,0	24,5
Уретан	$C_3H_7NO_2$	—	65,8	77,8	91,0	105,6	114,8	126,2	144,2	164,0	184,0	48,5
α -Фелландрен	$C_{10}H_{16}$	20,0	45,7	58,0	72,1	87,8	97,6	110,6	130,6	152,0	175,0	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Фениантрен	$C_{14}H_{10}$	118,2	154,3	173,0	193,7	215,8	229,9	249,0	277,1	308,0	340,2	99,5
2-Фенетидин	$C_8H_{11}NO$	67,0	94,7	108,6	123,7	139,9	149,8	163,5	184,0	207,0	228,0	—
Фенетиловый спирт	$C_8H_{10}O$	58,2	85,9	100,0	114,8	130,5	141,2	154,0	175,0	197,5	219,5	—
Фенетол	$C_8H_{10}O$	18,1	43,7	56,4	70,3	86,6	95,4	108,4	127,9	149,8	172,0	—30,2
Фенилацетат	$C_8H_8O_2$	38,2	64,8	78,0	92,3	108,1	118,1	131,6	151,2	173,5	195,9	—
Фенилацетилхлорид	C_8H_7ClO	48,0	75,3	89,0	103,6	119,8	129,8	143,5	163,8	186,0	210,0	—
Фенилацетонитрил	C_8H_7N	60,0	89,0	103,5	119,4	136,3	147,7	161,8	184,2	208,5	233,5	—23,8
Фенилбензоат	$C_{15}H_{12}O_2$	106,8	141,5	157,8	177,0	197,6	210,8	227,8	254,0	283,5	314,0	70,5
4-Фенил-3-бутен-2-он	$C_{10}H_{10}O$	81,7	112,2	127,4	143,8	161,3	172,6	187,8	211,0	235,4	261,0	41,5
Фенилгидразин	$C_6H_8N_2$	71,8	101,6	115,8	131,5	148,2	158,7	173,5	195,4	218,2	243,5P	19,5
Фенилглиоксаль	$C_8H_6Cl_4$	—	75,0	87,8	100,7	115,5	124,2	136,2	153,8	173,5	193,5	73
1,3-Фенилдиамин	$C_6H_8N_2$	99,8	131,2	147,0	163,8	182,5	194,0	209,9	233,0	259,0	285,5	62,8
Фенилдихлорфосфат	$C_6H_5Cl_2O_2P$	66,7	95,9	110,0	125,9	143,4	153,6	168,0	189,8	213,0	239,5	—
1,2-Фенилендиацетат	$C_{10}H_{10}O_4$	98,0	129,8	145,7	161,8	179,8	191,6	206,5	228,7	253,3	278,0	—
Фенилизотиоцианат	C_7H_5NS	47,2	75,6	89,8	115,5	122,5	133,3	147,7	169,6	194,0	218,5	—21,0
Фенилизотианат	C_7H_5NO	10,6	36,0	48,5	62,5	77,7	87,7	100,6	120,8	142,7	165,6	—
Фенилизотианид	C_7H_5N	12,0	37,0	49,7	63,4	78,3	88,0	101,0	120,8	142,3	165,0	—
N-Фениламинодиэтанол	$C_{10}H_{15}NO_2$	145,0	179,2	195,8	213,4	233,0	245,3	260,6	284,5	311,3	337,8	—
Фенилмеркаптан	C_6H_5S	18,6	43,7	56,0	69,7	84,2	93,9	106,6	125,8	146,7	168,0	—
1-Фенил-1,3-пентандион	$C_{11}H_{12}O_2$	98,0	128,5	144,0	159,9	178,0	189,8	204,5	226,7	251,2	276,5	—
3-Фенил-1-пропанол	$C_9H_{12}O$	74,7	102,4	116,0	131,2	147,4	156,8	170,3	191,2	212,8	235,0	—
Фенилтрихлорсилан [60]	$C_6H_5Cl_3Si$	—	—	75,3	89,8	105,9	116,3	130,3	151,5	175,5	201,0	—
Фенилуксусная кислота	$C_8H_6O_2$	97,0	127,0	141,3	156,0	173,6	184,5	198,2	219,5	243,0	265,5	76,5
2-Фенилфенон	$C_{12}H_{10}O$	100,0	131,6	146,2	163,3	180,3	192,2	205,9	227,9	251,8	275,0	56,5
4-Фенилфенон	$C_{12}H_{10}O$	—	—	176,2	193,8	213,0	225,3	240,9	263,2	285,5	308,0	164,5
Фенилциклогексан	$C_{12}H_{18}$	67,5	96,5	111,3	126,4	144,0	154,2	169,3	191,3	214,6	240,0	7,5
2-Феноксидиэтанол	$C_8H_{10}O_2$	78,0	106,6	121,2	136,0	152,2	163,2	176,5	197,6	221,0	245,3	11,6
2-Феноксидиэтилацетат	$C_{10}H_{12}O_3$	82,6	113,5	128,0	144,5	162,3	174,0	189,2	211,3	235,0	259,7	—6,7
Фенол	C_6H_6O	40,1	62,5	73,8	86,0	100,1	108,4	121,4	139,0	160,0	181,9	40,6
d-Фенхиловый спирт	$C_{10}H_{18}O$	45,8	70,3	82,1	95,6	110,8	120,2	132,3	150,0	173,2	201,0	35,0
Фенхоловая кислота	$C_{10}H_{16}O_2$	101,7	128,7	142,3	155,8	171,8	181,5	194,0	215,0	237,8	264,1	19,0
d-Фенхон	$C_{10}H_{16}O$	28,0	54,7	68,3	83,0	99,5	109,8	123,6	144,0	166,8	191,0	5,0
Флюорен	$C_{12}H_{10}$	—	129,3	146,0	164,2	185,2	197,8	214,7	240,3	268,6	295,0	113,0
Формальдегид	CH_2O	—	—	—88,0	—79,6	—70,6	—65,0	—57,3	—46,0	—33,0	—19,5	—92,0
Формамид	CH_3NO	70,5	96,3	109,5	122,5	137,5	147,0	157,5	175,5	193,5	210,5	—
Форон	$C_9H_{14}O$	42,0	68,3	81,5	95,6	111,3	121,4	134,0	153,5	175,3	197,2	28,0
Фосген	CCl_2O	—92,9	—77,0	—69,3	—60,3	—50,3	—44,0	—35,6	—22,3	—7,6	+8,3	—104,0
Фталевый ангидрид	$C_8H_4O_3$	96,5	121,3	134,0	151,7	172,0	185,3	202,3	228,0	256,8	284,5	130,8
Фталид	$C_8H_4Cl_2O_2$	95,5	127,7	144,0	161,3	181,0	193,5	210,0	234,5	261,8	290,0	73,0
Фталилхлорид	$C_8H_3Cl_2O_2$	86,3	118,3	134,2	151,0	170,0	182,2	197,8	222,0	248,3	275,8	88,5
Фторбензол	C_6H_5F	—43,4	—22,8	—12,4	—1,2	+11,5	19,6	30,4	47,2	65,7	84,7	—42,1
2-Фтортолуол	C_7H_7F	—24,2	—2,2	+8,9	21,4	34,7	43,7	55,3	73,0	92,8	114,0	—80,0
3-Фтортолуол	C_7H_7F	—22,4	—0,3	+11,0	23,4	37,0	45,8	57,5	75,4	95,4	116,0	—110,8
4-Фтортолуол	C_7H_7F	—21,8	+0,3	11,8	24,0	37,8	46,5	58,1	76,0	96,1	117,0	—
1-Фторэтилен	C_2H_3F	—149,3	—138,0	—132,2	—125,4	—118,0	—113,0	—106,2	—95,4	—84,0	—72,2	—160,5
транс-Фумарилхлорид	$C_4H_2Cl_2O_2$	15,0	38,5	51,8	65,0	79,5	89,0	101,0	120,0	140,0	160,0	—
Фурфуриловый спирт	$C_5H_6O_2$	31,8	56,0	68,0	81,0	95,7	104,0	115,9	133,1	151,8	170,0	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Фурфурол	$C_5H_4O_2$	18,5	42,6	54,8	67,8	82,1	91,5	103,4	121,8	141,8	161,8	—36,5
Хинолин	C_9H_7N	59,7	89,6	103,8	119,8	136,7	148,1	163,2	186,2	212,3	237,7	—15,0
Хлоральгидрат	$C_2H_3Cl_3O_2$	—9,8	+10,0	19,5	29,2	39,7	46,2	55,0	68,0	82,1	96,2P	51,7
2-Хлоранилин	C_6H_5ClN	46,3	72,3	84,8	99,2	115,6	125,7	139,5	160,0	183,7	208,8	—
3-Хлоранилин	C_6H_5ClN	63,5	89,8	102,0	116,7	133,6	144,1	158,0	179,5	203,5	228,5	—10,4
4-Хлоранилин	C_6H_5ClN	59,3	87,9	102,1	117,8	135,0	145,8	159,9	182,3	206,6	230,5	70,5
Хлорбензол	C_6H_5Cl	—13,0	+10,6	22,2	35,3	49,7	58,3	70,7	89,4	110,0	132,2	—45,2
1-Хлорбутан	C_4H_9Cl	—49,0	—28,9	—18,6	—7,4	+5,0	13,0	24,0	40,0	58,8	77,8	—123,1
Хлордиметилфенилсилан	$C_6H_{11}ClSi$	29,8	56,7	70,0	84,7	101,2	111,5	124,7	145,5	168,6	193,5	—
2-Хлордифенил	$C_{12}H_9Cl$	89,3	109,8	134,7	151,2	169,9	182,1	197,0	219,6	243,8	267,5	34,0
4-Хлордифенил	$C_{12}H_9Cl$	96,4	129,8	146,0	164,0	183,8	196,0	212,5	237,8	264,5	292,9	75,5
Хлордиформетан	$CHClF_2$	—122,8	—110,2	—103,7	—96,5	—88,6	—83,4	—76,4	—65,8	—53,6	—40,8	—160
α -Хлоркротоновая кислота	$C_4H_5ClO_2$	70,0	95,6	108,0	121,2	135,6	144,4	155,9	173,8	193,2	212,0	—
Хлорметилдифенилсилан	$C_{13}H_{13}ClSi$	105,0	137,5	152,7	170,0	189,2	200,5	216,0	240,5	266,5	295,5	—
Хлорметилсилан	CH_3ClSi	—95,0	—79,2	—71,0	—62,0	—51,7	—45,2	—36,4	—22,9	—7,8	+8,7	—
1-Хлорнафталин	$C_{10}H_7Cl$	80,6	104,8	118,6	134,4	153,2	165,6	180,4	204,2	230,8	259,3	—20,0
Хлорпикрин	CCl_3NO_2	—25,5	—3,3	+7,8	20,0	33,8	42,3	53,8	71,8	91,8	111,9	—64,0
2-Хлорпиридин	C_5H_5ClN	13,3	38,8	51,7	65,8	81,7	91,6	104,6	125,0	147,7	170,2	—
1-Хлорпропан	C_3H_7Cl	—68,3	—50,0	—41,0	—31,0	—19,5	—12,1	—2,5	+12,2	29,4	46,4	—122,8
2-Хлорпропан	C_3H_7Cl	—78,8	—61,1	—52,0	—42,0	—31,0	—23,5	—13,7	+1,3	18,1	36,5	—117
1-Хлорпропилен	C_3H_5Cl	—81,3	—63,4	—54,1	—44,0	—32,7	—25,1	—15,1	+1,3	18,0	37,0	—99,0
3-Хлорпропилен	C_3H_5Cl	—70,0	—52,0	—42,9	—32,8	—21,2	—14,1	—4,5	+10,0	27,5	44,6	—136,4
γ -Хлорпропилтрихлорсилан [60]	$C_3H_6Cl_4Si$	—	—	62,3	76,4	91,9	101,8	115,3	135,4	158,3	182,3	—
3-Хлорстирол	C_8H_7Cl	25,3	51,3	65,2	80,0	96,5	107,2	121,2	142,0P	165,7P	190,0P	—
4-Хлорстирол	C_8H_7Cl	28,0	54,5	67,5	82,0	98,0	108,5	122,0	143,5P	166,0P	191,0P	—15,0
1-Хлортетрадекан	$C_{14}H_{29}Cl$	98,5	131,8	148,2	166,2	187,0	199,8	215,5	240,3	267,5	296,0	0,9
α -Хлортолуол	C_7H_7Cl	22,0	47,8	60,8	75,0	90,7	100,5	114,2	134,0	155,8	179,4	—39,0
2-Хлортолуол	C_7H_7Cl	5,4	30,6	43,2	56,9	72,0	81,8	94,7	115,0	137,1	159,3	—
3-Хлортолуол	C_7H_7Cl	4,8	20,3	43,2	57,4	73,0	83,2	96,3	116,6	139,7	162,3	—
4-Хлортолуол	C_7H_7Cl	5,5	31,0	43,8	57,8	73,5	83,3	96,6	117,1	139,8	162,3	7,3
Хлортриметилсилан	C_3H_9ClSi	—62,8	—43,6	—34,0	—23,2	—11,4	—4,0	+6,0	21,9	39,4	57,9	—
Хлортрифторметан	$CClF_3$	—149,5	—139,2	—134,1	—128,5	—121,9	—117,3	—111,7	—102,5	—92,7	—81,2	—
2-Хлор- α , α , α -трифтортолуол	$C_7H_4ClF_3$	0,0	24,7	37,1	50,6	65,9	75,4	88,3	108,3	130,0	152,2	—6,0
1-Хлор-1, 2,2-трифторэтилен	C_2ClF_3	—116,0	—102,5	—95,9	—88,2	—79,7	—74,1	—66,7	—55,0	—41,7	—27,9	—157,5
Хлортриэтилсилан	$C_9H_{15}ClSi$	—4,9	+19,8	32,0	45,5	60,2	69,5	82,3	101,6	123,6	146,3	—
Хлоруксусная кислота	$C_2H_3ClO_2$	43,0	68,3	81,0	94,2	109,2	118,3	130,7	149,0	169,0	189,5	61,2
Хлоруксусный ангидрид	$C_2H_4Cl_2O_3$	67,2	94,1	108,0	122,4	138,2	148,0	159,8	177,8	197,0	217,0	46,0
4-Хлорфениловый спирт	C_6H_5ClO	84,0	114,3	129,0	145,0	162,0	173,5	188,1	210,0	234,5	259,3	—
2-Хлор-3-фенилфенол	$C_{12}H_9ClO$	118,0	152,2	169,7	186,7	207,4	219,6	237,0	261,3	289,4	317,5	6,0
2-Хлор-6-фенилфенол	$C_{12}H_9ClO$	119,8	153,7	170,7	189,8	208,2	220,0	237,1	261,6	289,5	317,0	—
2-Хлорфенол	C_6H_5ClO	12,1	38,2	51,2	65,9	82,0	92,0	106,0	126,4	149,8	174,5	7,0
3-Хлорфенол	C_6H_5ClO	44,2	72,0	86,1	101,7	118,0	129,4	143,0	164,8	188,7	214,0	32,5
4-Хлорфенол	C_6H_5ClO	49,8	78,2	92,2	108,1	125,0	136,1	150,0	172,0	196,0	220,0	42,0
бис-2-Хлорэтилацеталь	$C_6H_{12}Cl_2O_2$	56,2	83,7	97,6	112,2	127,8	138,0	150,7	169,8	190,5	212,6	—

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
1-Хлор-2-этилбензол	C_8H_9Cl	17,2	43,0	56,1	70,3	86,2	96,4	110,0	130,2	152,2	177,6	-80,2
1-Хлор-3-этилбензол	C_8H_9Cl	18,6	45,2	58,2	73,0	89,2	99,6	113,6	133,8	156,7	181,1	-53,3
1-Хлор-4-этилбензол	C_8H_9Cl	19,2	46,4	60,0	75,5	91,8	102,0	116,0	137,0	159,8	184,3	-62,6
1-Хлорэтилен	C_3H_3Cl	-105,6	-90,8	-83,7	-75,7	-66,8	-61,1	-53,2	-41,3	-28,0	-13,8	-153,7
2-Хлорэтил- α -метилбензилловый эфир	$C_{10}H_{13}ClO$	62,3	91,4	106,0	121,8	139,6	150,0	164,8	186,3	210,8	235,0	—
2-Хлорэтилхлорацетат	$C_4H_6Cl_2O_2$	46,0	72,1	86,0	100,0	116,0	126,2	140,0	159,8	182,2	205,0	—
2-Хлорэтил-2-хлоризопропиловый эфир	$C_5H_{10}Cl_2O$	24,7	50,1	63,0	77,2	92,4	102,2	115,8	135,7	156,5	180,0	—
2-Хлорэтил-2-хлорпропиловый эфир	$C_6H_{10}Cl_2O$	29,8	56,5	70,0	84,8	101,5	111,8	125,6	146,3	169,8	194,1	—
1-Хлор-2-этоксibenзол	C_8H_9ClO	45,8	72,8	86,5	101,5	117,8	127,8	141,8	162,0	185,0	208,0	—
Хлорэтоксиметилфенилсилан	$C_9H_{13}ClOSi$	44,8	72,3	94,6	101,3	117,8	128,0	142,6	163,5	187,7	212,0	—
2-(-2-Хлорэтокси)-этанол	$C_4H_9ClO_2$	53,0	78,3	90,7	104,1	118,4	127,5	139,5	157,2	176,5	196,0	—
Цетиламин	$C_{16}H_{35}N$	123,6	157,8	176,0	195,7	215,7	228,8	245,8	272,2	300,4	330,0	—
Цетиловый спирт	$C_{16}H_{34}O$	122,7	158,3	177,8	197,8	219,8	234,3	251,7	280,2	312,7	344,0	49,3
Циан бромистый	$BrCN$	-35,7	-18,3	-10,0	-1,0	+8,6	14,7	22,6	33,8	46,0	61,5	58,0
Циан иодистый	ICN	25,2	47,2	57,7	68,6	80,3	88,0	97,6	111,5	126,1	141,1	—
2-Циано-2-бутилацетат	$C_7H_{11}NO_2$	42,0	68,7	82,0	96,2	111,8	121,5	133,8	152,2	173,4	195,2	—
Циан фтористый	FCN	-134,4	-123,8	-118,5	-112,8	-106,4	-102,3	-97,0	-89,2	-80,5	-72,6	—
Циан хлористый	$CClN$	-76,7	-61,4	-53,8	-46,1	-37,5	-32,1	-24,9	-14,1	-2,3	+13,1	-6,5
Циклобутан	C_4H_8	-92,0	-76,0	-67,9	-58,7	-48,4	-41,8	-32,8	-18,9	-3,4	+12,9	-50,0
Циклобутен	C_4H_6	-99,1	-83,4	-75,4	-66,6	-56,4	-50,0	-41,2	-27,8	-12,2	+2,4	—
Циклогексан	C_6H_{12}	-45,3	-25,4	-15,9	-5,0	+6,7	14,7	25,5	42,0	60,8	80,7	6,6
Циклогексано́л	$C_6H_{12}O$	21,0	44,0	56,0	68,8	83,0	91,8	103,7	121,7	141,4	161,0	23,9
Циклогексанон	$C_6H_{10}O$	1,4	26,4	38,7	52,5	67,8	77,5	90,4	110,3	132,5	155,6	-45,0
Циклогексано́л-4,6-динитрофено́л	$C_6H_6O_5$	50,4	77,2	90,0	104,0	119,8	129,8	142,7	161,7	183,5	205,4	—
2-Циклогексил-4,6-динитрофено́л	$C_{12}H_{14}N_2O_5$	132,8	161,8	175,9	191,2	206,7	216,0	229,0	248,7	269,8	291,5	—
Циклопентан	C_5H_{10}	-68,0	-49,6	-40,4	-30,1	-18,6	-11,3	-1,3	+13,8	31,0	49,3	-93,7
Циклопропан	C_3H_6	-116,8	-104,2	-97,5	-90,3	-82,3	-77,0	-70,0	-59,1	-46,9	-33,5	-126,6
Цимол	$C_{10}H_{14}$	19,0	44,6	57,6	71,5	87,0	96,8	110,1	130,0	151,8	175,0	—
Цинеол	$C_{10}H_{18}O$	15,0	40,9	54,1	68,5	84,2	94,3	108,2	128,7	151,6	176,0	1,0
Цитраксный ангидрид	$C_5H_4O_3$	47,1	74,8	88,9	103,8	120,3	131,3	145,4	165,8	189,8	213,5	—
α -Цитраль	$C_{10}H_{16}O$	61,7	90,0	103,9	119,4	135,9	146,3	160,0	181,8	205,0	228,0P	—
d-Цитронеллаль	$C_{10}H_{16}O$	44,0	71,4	84,8	99,8	116,1	126,2	140,1	160,0	183,8	206,5	—
Цитронеллилацетат	$C_{12}H_{22}O_2$	74,7	100,2	113,0	126,0	140,5	149,7	161,0	178,8	197,8	217,0	—
Цитронелловая кислота	$C_{10}H_{16}O_2$	99,5	127,3	141,4	155,6	171,9	182,1	195,4	214,5	236,6	257,0	—
Цитронелло́л	$C_{10}H_{18}O$	66,4	93,6	107,0	121,5	137,2	147,2	159,8	179,8	201,0	221,5	—
Эвгенилацетат	$C_{12}H_{14}O_3$	101,6	132,3	148,0	164,2	183,0	194,0	209,7	232,5	257,4	282,0	29,5
Эвгено́л	$C_{10}H_{12}O_2$	78,4	108,1	123,0	138,7	155,8	167,3	182,2	204,7	228,3	253,5	—
Эйкозаметилнонасилкоксан	$C_{20}H_{40}O_8Si_9$	144,0	173,5	189,0	205,0	220,5	231,0	244,3	264,2	286,0	307,5	—
Элаидиновая кислота	$C_{18}H_{34}O_2$	171,3	206,7	223,5	242,3	260,8	273,0	288,0	312,4	337,0	362,0	51,5
Эна́тилхлорид	$C_7H_{13}ClO$	34,2	54,6	64,6	75,0	86,4	93,5	102,7	116,3	130,7	145,0	—
Эна́товая кислота	$C_7H_{14}O_2$	78,0	101,3	113,2	125,6	139,5	148,5	160,0	179,5	199,6	221,5	-10,0
Эна́товый альдегид	$C_7H_{14}O$	12,0	32,7	43,0	54,0	66,3	74,0	84,0	102,0	125,5	155,0	-42,0

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Энантонитрил	$C_7H_{13}N$	21,0	47,8	6,16	76,3	92,6	103,0	116,8	137,7	160,0	184,6	—
Энантофенон	$C_{13}H_{18}O$	100,0	130,3	145,5	161,0	178,9	189,9	204,2	225,0	248,3	271,3	—
Эпихлоргидрин	C_3H_5ClO	— 16,5	+ 5,6	16,6	29,0	42,0	50,6	62,0	79,3	98,0	117,9	—25,6
1,2-Эпокси-2-метилпропан	C_4H_8O	— 69,0	— 50,0	— 40,3	— 29,5	— 17,3	— 9,7	+ 1,2	17,5	36,0	55,5	—
Эруковая кислота	$C_{22}H_{42}O_2$	206,7	239,7	254,5	270,6	289,1	300,2	314,4	336,5	358,8	381,5 P	33,5
Эстрагол	$C_{10}H_{12}O$	52,6	80,0	93,7	108,4	124,6	135,2	148,5	168,7	192,0	215,0	—
Этан	C_2H_6	—159,5	—148,5	—142,9	—136,7	—129,8	—125,4	—119,3	—110,2	—99,7	—88,6	—183,2
Этанол	C_2H_5O	— 31,3	— 12,0	— 2,3	+ 8,0	19,0	26,0	34,9	48,4	63,5	78,4	—112
Этилакрилат	$C_5H_8O_2$	— 29,5	— 8,7	+ 2,0	13,0	26,0	33,5	44,5	61,5	80,0	99,5	— 71,2
α -Этилакрилонитрил	C_5H_7N	— 29,0	— 6,4	+ 5,0	17,7	31,8	40,6	53,0	71,6	92,2	114,0	—
α -Этилакриловая кислота	$C_5H_8O_2$	47,0	70,7	82,0	94,4	108,1	116,7	127,5	144,0	160,7	179,2	—
Этиламин	C_2H_7N	— 82,3	— 66,4	— 58,3	— 48,6	— 39,8	— 33,4	— 25,1	— 12,3	+ 2,0	16,6	—80,6
2-Этиланизол	$C_9H_{12}O$	29,7	55,9	69,0	83,1	98,8	109,0	122,3	142,1	164,2	187,1	—
3-Этиланизол	$C_9H_{12}O$	33,7	60,3	73,9	88,5	104,8	115,5	129,2	149,7	172,8	196,5	—
4-Этиланизол	$C_9H_{12}O$	33,5	60,2	73,9	88,5	104,7	115,4	129,2	149,2	172,3	196,5	—
N-Этиланилин	$C_8H_{11}N$	38,5	66,4	80,6	96,0	113,2	123,6	137,3	156,9	180,8	204,0	— 63,5
4-Этиланилин	$C_8H_{11}N$	52,0	80,0	93,8	109,0	125,7	136,0	149,8	170,6	194,2	217,4	— 4,0
Этилацетат	$C_4H_8O_2$	— 43,4	— 23,5	— 13,5	— 3,0	+ 9,1	16,6	27,0	42,0	59,3	77,1	— 82,4
Этилацетоацетат	$C_6H_{10}O_3$	28,5	54,0	67,3	81,1	96,2	106,0	118,5	138,0	158,2	180,8	— 45,0
Этилбензоат	$C_8H_{10}O_2$	44,0	72,0	86,0	101,4	118,2	129,0	143,2	164,8	188,4	213,4	— 34,6
Этилбензолацетат	$C_{11}H_{12}O_3$	107,6	136,4	150,3	165,8	181,8	191,9	205,0	223,8	244,7	265,0 P	—
Этилбензол	C_8H_{10}	— 9,8	+ 13,9	25,9	38,6	52,8	61,8	74,1	92,7	113,8	136,2	— 94,9
Этилбромид	C_2H_5Br	— 74,3	— 56,4	— 47,5	— 37,8	— 26,7	— 19,5	— 10,0	+ 4,5	21,0	38,4	—117,8
Этил- α -бромизобутират	$C_6H_{11}BrO_2$	10,6	35,8	48,0	61,8	77,0	86,7	99,8	119,7	141,2	163,6	—
Этилбутират [60]	$C_6H_{12}O_2$	— 18,4	+ 4,0	15,3	27,8	41,5	50,1	62,0	79,8	100,0	121,0	— 93,3
Этилвинилдихлорсилан	$C_4H_8Cl_2Si$	—	—	15,5	28,1	42,1	51,0	63,1	81,3	102,0	123,7	—
3-Этилгексан	C_8H_{18}	— 20,0	+ 2,1	12,8	25,0	38,5	47,1	58,9	76,7	97,0	118,5	—
2-Этилгексилакрилат	$C_{11}H_{20}O_2$	50,0	77,7	91,8	106,3	123,7	134,0	147,9	168,2	192,2	216,0	—
Этилгликолат	$C_4H_8O_3$	14,3	38,8	50,5	63,9	78,1	87,6	99,8	117,8	138,0	158,2	—
2-Этилдисилазан	$C_2H_{11}NSi_2$	— 62,0	— 42,3	— 32,3	— 21,0	— 8,3	— 0,3	+ 10,4	27,0	45,9	65,9	—127,0
Этилдифениламин	$C_{14}H_{18}N$	98,3	130,2	146,0	162,8	182,0	193,7	209,8	233,0	258,8	286,0	—
Этилдихлорацетат	$C_4H_6Cl_2O_2$	9,6	34,0	46,3	59,5	74,0	83,6	96,1	115,2	135,9	156,5	—
Этилдихлорсилан [60]	$C_2H_6Cl_2Si$	—	—	— 24,4	— 12,0	+ 0,8	9,1	20,4	37,8	56,0	75,5	—
Этил-N, N-диэтилоксамат	$C_8H_{15}NO_3$	76,0	106,3	121,7	137,7	154,4	166,0	180,3	202,8	226,5	252,0	—
Этилен	C_2H_4	—168,3	—158,3	—153,2	—147,6	—141,3	—137,3	—131,8	—123,4	—113,9	—103,7	—169,0
Этилена окись	C_2H_2O	— 89,7	— 73,8	— 65,7	— 56,6	— 46,9	— 40,7	— 32,1	— 19,5	— 4,9	+ 10,7	—111,3
1,2-Этиленгликоль	C_2H_6O	53,0	79,7	92,1	105,8	120,0	129,5	141,8	158,5	178,5	197,3	— 15,6
Этилендиамин	$C_2H_8N_2$	— 11,0	+ 10,5	21,5	33,0	45,8	53,8	62,5	81,0	99,0	117,2	8,5
Этилен-бис-(хлорацетат)	$C_6H_8Cl_2O_4$	112,0	142,4	158,0	173,5	191,0	201,8	215,0	237,3	259,5	283,5	—
Этиленхлоргидрин	C_2H_5ClO	— 4,0	+ 19,0	30,3	42,5	56,0	64,1	75,0	91,8	110,0	128,8	— 69,0
Этилизобутират	$C_6H_{12}O_2$	— 24,3	— 2,4	+ 8,4	20,6	33,8	42,3	53,5	71,0	90,0	110,1	— 88,2
Этилизовалерат	$C_8H_{14}O_2$	— 6,1	+ 17,0	28,7	41,3	55,2	64,0	75,9	93,8	114,0	134,3	— 99,3
Этилизокaproат	$C_8H_{16}O_2$	11,0	35,8	48,0	61,7	76,3	85,8	98,4	117,8	139,2	160,4	—
Этилизотиоцианат	C_2H_5NS	— 13,2	+ 10,6	22,8	36,1	50,8	59,8	71,9	90,0	110,1	131,0	— 5,9
Этилиодид	C_2H_5I	— 54,4	— 34,3	— 24,3	— 13,1	— 0,9	+ 7,2	18,0	34,1	52,3	72,4	—105,0
Этилкамфороновый гидрид	$C_{11}H_{16}O_5$	118,2	149,8	165,0	181,8	199,8	211,5	226,6	248,5	272,8	298,0	—
Этилкарбанилат	$C_9H_{11}NO_2$	107,8	131,8	143,7	155,5	168,8	177,3	187,9	203,8	220,0	237,0	52,5

Вещество	Формула	Давление пара, мм рт. ст.										Температура плавления, °C
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
4-Этил-1,3-ксилол	$C_{10}H_{14}$	23,2	49,8	63,0	77,5	93,4	103,8	117,2	138,0	160,2	184,5	—
5-Этил-1,3-ксилол	$C_{10}H_{14}$	23,2	49,7	62,8	77,3	93,4	103,7	117,2	138,0	160,4	185,0	—
2-Этил-1,4-ксилол	$C_{10}H_{14}$	24,1	50,6	64,0	78,3	94,1	104,3	118,0	138,4	161,0	185,0	—
3-Этилкумол	$C_{11}H_{16}$	28,3	55,5	68,8	83,6	99,9	110,2	124,3	145,4	168,2	193,0	—
4-Этилкумол	$C_{11}H_{16}$	31,5	58,4	72,0	86,7	103,3	113,8	127,2	148,3	171,8	195,8	—
Этилдевулилат	$C_8H_{12}O_3$	47,3	74,0	87,3	101,8	117,7	127,6	141,3	160,2	183,0	206,2	—
Этил-1-лейцинат	$C_8H_{17}NO_2$	27,8	57,3	72,1	88,0	106,0	117,8	131,8	149,8	167,3	184,0	—
Этилмеркаптан	C_5H_6S	— 76,7	— 59,1	— 50,2	— 40,7	— 29,8	— 22,4	— 13,0	+ 1,5	17,7	35,0	—121,0
Этилметилвый эфир	C_5H_8O	— 91,0	— 75,6	— 67,8	— 59,1	— 49,4	— 43,3	— 34,8	— 22,0	— 7,8	+ 7,5	—
1-Этилнафталин	$C_{12}H_{12}$	70,0	101,4	116,8	133,8	152,0	164,1	180,0	204,6	230,8	258,1 P	— 27,0
Этил-3-нитробензоат	$C_8H_6NO_4$	108,1	140,2	155,0	173,6	192,6	205,0	220,3	244,6	270,6	298,0	47,0
Этилоксилат	$C_4H_5ClO_8$	— 5,1	+ 18,0	29,9	42,0	56,0	65,2	76,6	94,5	114,7	135,0	—
3-Этилпентан	C_8H_{16}	— 37,8	— 17,0	— 6,8	+ 4,7	17,5	25,7	36,9	53,8	73,0	93,5	—118,6
Этилпропиловый эфир	$C_5H_{12}O$	— 64,3	— 45,0	— 35,0	— 24,0	— 12,0	— 4,0	+ 6,8	23,3	41,6	61,7	—
Этилпропионат	$C_5H_{10}O_2$	— 28,0	— 7,2	+ 3,4	14,3	27,2	35,1	45,2	61,7	79,8	99,1	— 72,6
Этилсалицилат	$C_8H_{10}O_3$	61,2	90,0	104,2	119,3	136,7	147,6	161,5	183,7	207,0	231,5	1,3
3-Этилстирол	$C_{10}H_{12}$	28,3	55,0	68,3	82,8	99,2	109,6	123,2	144,0	167,2	191,5 П	—
4-Этилстирол	$C_{10}H_{12}$	26,0	52,7	66,3	80,8	97,3	107,6	121,5	142,0	165,0	189,0 П	—
2-Этилтолуол	C_9H_{12}	9,4	34,8	47,6	61,2	76,4	86,0	99,0	119,0	141,4	165,1	—
3-Этилтолуол	C_9H_{12}	7,2	32,3	44,7	58,2	73,3	82,9	95,9	115,5	137,8	161,3	—104,7
4-Этилтолуол	C_9H_{12}	7,6	32,7	44,9	58,5	73,6	83,2	96,3	116,1	136,4	162,0	—
Этилтриметилолово	$C_5H_{14}Si$	— 30,0	— 7,6	+ 3,8	16,1	30,0	38,4	50,0	67,3	87,6	108,8	—
Этилтриметилсилан	$C_5H_{14}Si$	— 60,6	— 41,4	— 31,8	— 21,0	— 9,0	— 1,2	+ 9,2	25,0	42,8	62,0	—
Этилтрифторсилан	$C_4H_5F_3Si$	— 95,4	— 81,0	— 73,7	— 65,8	— 56,8	— 51,1	— 43,6	— 32,2	— 19,1	— 5,4	—
Этилтрихлорацетат	$C_4H_5Cl_3O_2$	20,7	45,5	57,7	70,6	85,5	94,4	107,4	125,8	146,0	167,0	—
Этилтрихлорсилан [60]	$C_4H_5Cl_3Si$	—	—	— 1,6	+ 9,7	22,3	30,4	41,5	58,4	77,9	98,8	—
Этилтриэтоксилан [63]	$C_8H_{20}O_3Si$	—	—	50,5	63,4	77,7	86,8	99,2	117,7	138,8	160,9	—
4-Этилфенетол	$C_{10}H_{14}O$	48,5	75,7	89,5	103,8	119,8	129,8	143,5	163,2	185,7	208,0	—
2-Этилфенол	$C_8H_{10}O$	46,2	73,4	87,0	101,5	117,9	127,9	141,8	161,6	184,5	207,5	— 45,0
3-Этилфенол	$C_8H_{10}O$	60,0	86,8	100,2	114,5	130,0	139,8	152,0	171,8	193,3	214,0	— 4,0
4-Этилфенол	$C_8H_{10}O$	59,3	86,5	100,2	115,0	131,3	141,7	154,2	175,0	197,4	219,0	46,5
Этилформиат	$C_5H_8O_2$	— 60,5	— 42,2	— 33,0	— 22,7	— 11,5	— 4,3	+ 5,4	20,0	37,1	54,3	— 79,0
Этилфторид	C_5H_5F	— 117,0	— 103,8	— 97,7	— 90,0	— 81,8	— 76,4	— 69,3	— 58,0	— 45,5	— 32,0	—
Этил-2-фурилат	$C_8H_8O_3$	37,6	63,8	77,1	91,5	107,5	117,5	130,4	150,1	172,5	195,0	34,0
Этилхлорацетат	$C_4H_7ClO_2$	1,0	25,4	37,5	50,4	65,2	74,0	86,0	103,8	123,8	144,2	— 26,0
Этилхлорид	C_5H_5Cl	— 89,8	— 73,9	— 65,8	— 56,8	— 47,0	— 40,6	— 32,0	— 18,6	— 3,9	+ 12,3	— 139,0
Этил-α-хлорпропионат	$C_5H_9ClO_2$	6,6	30,2	41,9	54,3	68,2	77,3	83,9	107,2	126,2	146,5	—
Этилцетиламин	$C_{18}H_{35}N$	133,2	168,2	186,0	205,5	226,5	239,8	256,8	283,3	313,0	342,0 P	—
Этилцианацетат	$C_5H_7NO_2$	67,8	93,5	106,0	119,8	133,8	142,1	152,8	169,8	187,8	206,0	—
Этилциклогексан	C_8H_{16}	— 14,5	+ 9,2	20,6	33,4	47,6	56,7	69,0	87,8	109,1	131,8	— 111,3
Этилциклопентан	C_7H_{14}	— 32,2	— 10,8	— 0,1	+ 11,7	25,0	33,4	45,0	62,4	82,3	103,4	— 138,6
Этил-транс-циннамат	$C_{11}H_{12}O_2$	87,6	108,5	134,0	150,3	169,2	181,2	196,0	219,3	245,0	271,0	12,0
Этил-α-этилацетоацетат	$C_8H_{14}O_3$	40,5	67,3	80,2	94,6	110,3	120,6	133,8	153,2	175,6	198,0	—
Этоксидиметилфенилсилан	$C_{10}H_{16}OSi$	36,3	63,1	76,2	91,0	107,2	127,5	131,4	151,5	175,0	199,5	—
Этоксиметилдифенилсилан	$C_{15}H_{18}OSi$	109,0	138,5	152,7	168,2	185,0	196,7	211,8	234,0	256,8	282,0	—
Этокситриметилсилан	$C_6H_{14}OSi$	— 50,9	— 31,0	— 20,7	— 9,8	+ 3,7	11,5	22,1	38,1	56,3	75,7	—
Этокситрифенилсилан	$C_{20}H_{20}OSi$	167,0	198,2	213,5	230,0	247,0	258,3	273,5	295,0	319,5	344,0	—
Янтарный ангидрид	$C_4H_4O_3$	92,0	115,0	128,2	145,3	163,0	174,0	189,0	212,0	237,0	261,0	119,6

Температура, °С, при которой устанавливается указанное давление паров органических веществ (выше 1 атм) [34]

Вещество	Формула	Давление пара, атм									Критическая температура, °С	Критическое давление, атм
		1	2	5	10	20	30	40	50	60		
Анилин	C_6H_7N	184,4	212,8	254,8	292,7	342,0	375,5	400,0	422,4	—	426,0	52,4
Ацетилен	C_2H_2	—84,0	—71,6	—50,2	—32,7	—10,0	+4,8	16,8	26,8	34,8	36,0	62,0
Ацетон	C_3H_6O	56,5	78,6	113,0	144,5	181,0	205,0	214,5	—	—	235,0	47,0
Бензол	C_6H_6	80,1	103,8	142,5	178,8	221,5	249,5	272,3	290,3	—	290,5	50,1
Бромбензол	C_6H_5Br	156,2	186,2	232,5	274,5	327,0	359,8	387,5	—	—	397,0	44,6
1,3-Бутадиен	C_4H_6	—4,5	+15,3	47,0	76,0	114,0	139,8	160,0	—	—	161,8	42,6
Бутан	C_4H_{10}	—0,5	+18,8	50,0	79,5	116,0	140,6	—	—	—	152,8	36,0
Бутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	117,5	139,8	172,5	203,0	237,0	259,0	277,0	—	—	287	48,4
втор-Бутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	99,5	118,2	147,5	172,0	204,0	230,0	251,1	—	—	265	48,0
трет-Бутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	82,9	102,0	130,0	154,2	184,5	207,0	222,5	—	—	235,0	49,0
Гексан	C_6H_{14}	68,7	93,0	131,7	166,6	209,4	—	—	—	—	234,8	29,6
Гептан	C_7H_{16}	98,4	124,8	165,7	202,8	247,5	—	—	—	—	266,8	26,9
Двуокись углерода	CO_2	—78,2	—69,1	—56,7	—39,5	—18,9	—5,3	+5,9	14,9	22,4	31,1	73,0
1,2-Дибромэтан	$C_2H_4Br_2$	131,5	157,7	200,0	237,0	269,0	286,0	295,0	300,0	304,5	309,8	70,6
Диметиламин	C_2H_7N	7,4	25,0	53,9	80,0	111,7	132,2	149,8	162,6	—	164,5	52,4
2,3-Диметилбутан	C_6H_{14}	58,0	82,0	120,3	155,7	198,7	225,5	—	—	—	227,4	30,7
Диметиловый эфир	C_2H_6O	—23,7	—6,4	+20,8	45,5	75,7	96,0	112,1	125,2	—	126,9	52,0
Диметилоксалат	$C_4H_6O_4$	163,3	189,6	228,7	—	—	—	—	—	—	260,0	9,5
2,2-Диметилпропан	C_5H_{12}	9,5	29,5	61,1	90,7	127,6	152,5	—	—	—	159,0	33,0
Диметилсульфид	C_2H_6S	36,0	57,8	92,3	124,5	163,8	188,5	209,0	224,5	—	229,9	54,6
Дихлордифторметан	CCl_2F_2	—29,8	—12,2	+16,1	42,4	74,0	95,6	—	—	—	111,5	39,6
Дихлорфторметан	$CHCl_2F$	8,9	28,4	59,0	87,0	121,2	144,0	162,6	177,5	—	178,5	51,0
1,2-Дихлор-1,1,2,2-тетрафторэтан	$C_2Cl_2F_4$	3,5	22,8	54,0	82,3	117,5	140,9	—	—	—	145,7	32,3
1,1-Дихлорэтан	$C_2H_4Cl_2$	57,3	80,2	117,3	150,3	192,7	220,0	243,0	261,5	—	261,5	50,0
1,2-Дихлорэтан	$C_2H_4Cl_2$	83,7	108,1	147,8	183,5	226,5	254,0	272,0	285,0	—	288,4	53,0
цис-1,2-Дихлорэтилен	$C_2H_2Cl_2$	59,0	82,1	119,3	152,3	194,0	221,5	244,5	260,0	—	271,0	57,9
транс-1,2-Дихлорэтилен	$C_2H_2Cl_2$	47,8	69,8	104,0	135,7	174,0	199,8	220,0	236,5	—	243,3	54,5
Дициан	C_2N_2	—21,0	—4,4	+21,4	44,6	72,6	91,6	106,5	118,2	—	126,6	58,2
Диэтиламин	$C_4H_{11}N$	55,5	77,8	113,0	145,3	184,5	210,0	—	—	—	223,3	36,6
Диэтиловый эфир	$C_4H_{10}O$	34,6	56,0	90,0	122,0	159,0	183,3	—	—	—	193,8	35,5
Диэтилсульфид	$C_4H_{10}S$	88,0	112,0	153,8	190,2	234,0	263,0	—	—	—	283,8	39,1
Додекан	$C_{12}H_{26}$	214,5	248,2	300,0	345,8	—	—	—	—	—	385	17,5
Изобутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	108,0	127,3	156,2	182,0	212,5	232,0	251,0	—	—	265	48,0
Изобутилформат	$C_5H_{10}O_2$	98,2	121,8	157,8	192,4	234,0	261,0	—	—	—	278,0	38,0
Изомасляная кислота	$C_4H_8O_2$	154,5	179,8	217,0	250,0	289,0	315,0	336,0	—	—	336	40,0
Иодбензол	C_6H_5I	188,6	220,0	270,0	315,7	371,5	406,0	437,2	—	—	448,0	44,7
Масляная кислота	$C_4H_8O_2$	163,5	188,3	225,0	257,0	295,0	319,0	338,0	352,0	—	355	52,0
Метан	CH_4	—161,5	—152,3	—138,3	—124,8	—108,5	—96,3	—86,3	—	—	—82,1	45,8
Метанол	CH_4O	64,7	84,0	112,5	138,0	167,8	186,5	203,5	214,0	224,0	240,0	78,7
Метиламин	CH_5N	—6,3	+10,1	36,0	59,5	87,8	106,3	121,8	133,7	144,6	156,9	73,6
Метилацетат	$C_3H_6O_2$	57,8	79,5	113,1	144,2	181,0	205,0	225,0	—	—	233,7	46,3
Метилбромид	CH_3Br	3,6	23,3	54,8	84,0	121,7	147,5	170,2	190,0	—	194	51,6
2-Метилбутан	C_5H_{12}	27,8	48,8	82,8	114,5	154,0	180,3	—	—	—	187,8	32,8
Метилбутират	$C_5H_{10}O_2$	102,3	127,5	166,7	203,0	244,5	272,0	—	—	—	281,2	34,2
Метилизобутират	$C_5H_{10}O_2$	92,6	116,7	155,2	190,2	232,0	259,5	—	—	—	267,5	33,9
Метилиодид	CH_3I	42,4	65,5	101,8	138,0	176,5	206,0	228,5	248,0	—	255	54,6
Метилмеркаптан	CH_4S	6,8	26,1	55,9	83,4	117,5	140,0	157,7	172,0	185,0	196,8	71,4

Вещество	Формула	Давление пара, атм									Критическая температура, °C	Критическое давление, атм
		1	2	5	10	20	30	40	50	60		
2-Метилпропан	C_4H_{10}	-11,7	+7,5	39,0	69,3	108,7	137,5	—	—	—	134,0	37,0
Метилпропионат	$C_4H_8O_2$	79,3	103,0	139,8	172,6	212,5	239,0	—	—	—	257,4	39,3
Метилформиат	$C_2H_4O_2$	32,0	51,9	83,5	112,0	147,2	169,7	188,5	213,0	—	214,0	59,1
Метилфторид	CH_3F	-78,2	-64,5	-42,0	-21,0	+2,6	15,5	26,5	36,0	43,5	44,9	62,0
Метилхлорид	CH_3Cl	-24,0	-6,4	+22,0	47,3	77,3	97,5	113,8	126,0	137,5	143,8	65,8
Окись углерода	CO	-191,3	-183,5	-170,7	-161,0	-149,7	-141,9	—	—	—	-138,7	34,6
Октан	C_8H_{18}	125,6	152,7	196,2	235,8	281,4	—	—	—	—	296,2	24,7
Пентан	C_5H_{12}	36,1	58,0	92,4	124,7	164,3	191,3	—	—	—	197,2	33,0
Пропилен	C_3H_6	-35,0	-18,4	+8,0	33,2	64,5	85,5	103,5	118,0	—	120,7	51,8
Пропан	C_3H_8	-42,1	-25,6	+1,4	26,9	58,1	78,7	94,8	—	—	96,8	42,0
1-Пропанол	C_3H_8O	97,8	117,0	149,0	177,0	210,8	232,3	250,0	—	—	263,7	49,9
2-Пропанол	C_3H_8O	82,5	101,3	130,2	157,0	186,0	205,0	220,2	232,0	—	235	53
Пропиламин	C_3H_7N	48,5	69,8	102,8	133,4	170,0	194,3	214,5	—	—	223,8	46,8
Пропилацетат	$C_5H_{10}O_2$	101,8	126,8	165,7	200,5	242,8	269	—	—	—	276,2	33,2
Пропилен	C_3H_6	-47,7	-31,4	-4,8	+19,8	49,5	70,0	85,0	—	—	91,4	45,4
Пропилформиат	$C_4H_8O_2$	81,8	104,3	142,0	176,4	217,5	245,0	—	—	—	264,8	39,5
Пропин	C_3H_4	-23,3	-7,1	+19,5	43,8	74,0	94,0	111,5	125,0	—	128,0	52,8
Пропионовая кислота	$C_3H_6O_2$	141,1	160,0	186,0	203,5	220,0	228,0	233,0	238,0	—	239,5	53,0
Сероуглерод	CS_2	46,5	69,1	104,8	136,3	175,5	201,5	222,8	240,0	256,0	273,0	72,9
Синильная кислота	HCN	25,8	45,5	75,5	103,5	134,2	154,0	170,2	183,5	—	183,5	50,0
Тетраметилсилан	$C_4H_{12}Si$	27,0	48,0	82,0	113,0	152,0	178,0	—	—	—	185,0	33,0
Толуол	C_7H_8	110,6	136,5	178,0	215,8	262,5	292,8	319,0	—	—	320,6	41,6
Трихлорметан	$CHCl_3$	61,3	83,9	120,0	152,3	191,8	216,5	237,5	254,0	—	260,0	54,9
1,1,2-Трихлор-1,2,2-трифторэтан	$C_2Cl_3F_3$	47,6	70,0	105,5	138,0	177,7	205,0	—	—	—	214,1	33,7
Трихлорфторметан	CCl_3F	23,7	44,1	77,3	108,2	146,7	172,0	194,0	—	—	198,0	43,2
Уксусная кислота	$C_2H_4O_2$	118,1	143,5	180,3	214,0	252,0	276,5	297,0	312,5	—	321,6	57,2
Уксусный ангидрид	$C_4H_6O_3$	139,6	162,0	194,0	221,5	253,0	272,8	288,5	—	—	296,0	46,0
Фенол	C_6H_6O	181,9	208,0	248,2	283,8	328,7	358,0	382,1	400,0	418,7	419,0	60,5
Фосген	CCl_2O	8,3	27,3	57,2	85,0	119,0	141,8	159,8	174,0	—	181,7	56,0
Фторбензол	C_6H_5F	84,7	109,9	148,5	184,4	227,6	257,0	279,3	—	—	286,5	44,7
Хлорбензол	C_6H_5Cl	132,2	160,2	205,0	245,3	292,8	324,4	349,8	—	—	359,2	44,6
Хлордифторметан	$CHClF_2$	-40,8	-24,7	+0,3	24,0	52,0	70,3	85,3	—	—	96,0	48,7
Хлортрифторметан	$CClF_3$	-81,2	-66,7	-42,7	-18,5	+12,0	34,8	52,8	—	—	53,0	40,3
1-Хлор-1,2,2-трифторэтилен	C_2ClF_3	-27,9	-11,1	+15,5	40,0	71,1	91,9	—	—	—	107,0	39,0
Циклогексан	C_6H_{12}	80,7	106,0	146,4	184,0	228,4	257,5	—	—	—	279,9	39,8
Четыреххлористый углерод	CCl_4	76,7	102,0	141,7	178,0	222,0	251,2	276,0	—	—	283,1	45,0
Этан	C_2H_6	-88,6	-75,0	-52,8	-32,0	-6,4	+10,0	23,6	—	—	32,3	48,2
Этанол	C_2H_6O	78,4	97,5	126,0	151,8	183,0	203,0	218,0	230,0	242,0	243,5	63,1
Этиламин	C_2H_7N	16,6	35,7	65,3	91,8	124,0	146,0	163,0	176,0	—	183,2	55,5
Этилацетат	$C_4H_8O_2$	77,1	100,6	136,6	169,7	209,5	235,0	—	—	—	250,1	37,9
Этилбензол	C_8H_{10}	136,2	163,5	207,5	246,3	294,5	326,5	—	—	—	346,4	38,1
Этилбромид	C_2H_5Br	38,4	60,2	95,0	126,8	164,3	188,0	206,5	220,0	229,5	230,8	61,5
Этилен	C_2H_4	-103,7	-90,8	-71,1	-52,8	-29,1	-14,2	-1,5	+8,9	—	9,6	50,7
Этилнорбутан	$C_6H_{12}O_2$	110,1	135,5	174,2	210,0	253,0	280,0	—	—	—	280,0	30,0
Этилмеркаптан	C_2H_6S	35,0	56,6	90,7	121,9	159,5	184,3	204,7	220,0	—	225,5	54,2
Этилметиловый эфир	C_4H_8O	7,5	26,5	56,4	84,0	108,0	141,4	160,0	—	—	164,7	43,4
Этилпропиловый эфир	$C_5H_{12}O$	61,7	85,3	123,1	156,2	197,2	223,0	—	—	—	227,4	32,1
Этилпропионат	$C_5H_{10}O_2$	99,1	123,8	162,7	197,8	240,0	264,5	—	—	—	272,8	33,2
Этилформиат	$C_3H_6O_2$	54,3	76,0	110,5	142,2	180,0	205,0	225,0	—	—	235,3	46,8
Этилфторид	C_2H_5F	-32,0	-16,7	+7,7	30,2	57,5	75,7	90,0	—	—	102,2	49,6
Этилхлорид	C_2H_5Cl	12,3	32,5	64,0	92,6	127,3	149,5	167,0	185,0	—	187,2	52,0

1. Вукалович М. П. Термодинамические свойства воды и водяного пара. М., Машгиз, 1955.
2. Несмеянов А. Н. Давление пара химических элементов. М., Изд-во АН СССР, 1961.
3. Cailletet L., Colardeau, Riviere. Compt. rend., 1900, v. 130, p. 1585.
4. Bernhardt F. Phys. Z., 1926, Bd 26, S. 265.
5. Honig R. E., Hook H. O. R. C.A. Rev., 1960, v. 21, p. 360.
6. Witt W. P., Barrow R. F. Trans. Faraday Soc., 1959, v. 55, p. 730.
7. Давление пара фтористого алюминия.— «Ж. неорган. химии», 1959, т. 4, с. 2196 (Авт.: Евсеев А. М., Пожарская Г. В., Несмеянов А. Н., Герасимов Я. И.)
8. Давление насыщенного пара фтористого бериллия.— «Ж. неорган. химии», 1959, т. 4, с. 2192 (Авт.: Хандамирова Н. Э., Евсеев А. М., Пожарская Г. В. и др.)
9. Несмеянов А. Н., Фирсов Л. П. «Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. Металлургия и топливо», 1959, № 3, с. 150.
10. Shimazaki Wada. Bull. Chem. Soc. Japan, 1956, v. 29, p. 294.
11. Диев Н. П., Давыдов В. Н. «Изв. вост. филиалов АН СССР», 1957, № 7, с. 60.
12. Несмеянов А. Н., Ильичева И. А. «Ж. физ. химии», 1958, т. 32, с. 422.
13. Измерение давления насыщенного пара твердых сплавов методом радиоактивных индикаторов.— «Ж. физ. химии», 1956, т. 30, с. 1250 (Авт.: Несмеянов А. Н., Иофа Б. З., Стрельников А. А., Фирсов В. Г.)
14. Корнеева И. В., Беляев А. В., Новоселова А. В. «Ж. неорган. химии», 1960, т. 5, с. 3.
15. Малышев В. В. «Теплофизика высоких температур», 1974, т. 12, с. 743.
16. Малышев В. В. «Теплофизика высоких температур», 1973, т. 11, с. 1010.
17. Малышев В. В. «Атомная энергия», 1973, т. 34, с. 42; В сб.: «Теплофизические свойства газов». М., «Наука», 1973.
18. Несмеянов А. Н., Сазонов А. А. «Ж. неорган. химии», 1957, т. 2, с. 1183.
19. Несмеянов А. Н., Сазонов А. А. «Ж. неорган. химии», 1959, т. 4, с. 230.
20. Давление пара фтористого лития. «Ж. неорган. химии», 1959, т. 4, с. 2189 (Авт.: Евсеев А. М., Пожарская Г. В., Несмеянов А. Н., Герасимов Я. И.)
21. Несмеянов А. Н., Сазонов А. А. «Ж. неорган. химии», 1959, т. 4, с. 231.
22. Несмеянов А. Н., Белых Л. П. «Ж. физ. химии», 1960, т. 34, с. 841.
23. The Vapour pressure of sodium fluoride. J. Phys. Chem., 1957, v. 61, p. 384. (Auth.: Sense K. A., Alexander C. A., Bowman R. E. e. a.)
24. Treadwell W. D., Werner W. Z. angew. Math. und Phys., 1953, Bd 4, S. 459.
25. Несмеянов А. Н., Иофа Б. З. «Ж. неорган. химии», 1959, т. 4, с. 486.
26. Horbe R., Knacke O.—Z. Erzbergbau und Metallhüttenwesen, 1959, Bd 12, S. 321.
27. Darnell A. J., McCollum W. A., Milne T. A. J. Phys. Chem., 1960, v. 64, p. 341.
28. Ackermann R. J., Gilles P. W. J. Chem. Phys., 1956, v. 25, p. 1089.
29. Кац Дж., Рабинович Е. Химия урана. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1954.
30. Попов М. М., Костылев Ф. А., Зубова Н. В. «Ж. неорган. химии», 1959, т. 4, с. 1708.
31. Wang Ke-Chin. J. Amer. Ceram. Soc., 1960, v. 43, p. 509.
32. Корнеева И. В., Соколов В. В., Новоселова А. В. «Ж. неорган. химии», 1960, т. 5, с. 241.
33. Авербух Б. Д., Ветренко Е. А., Чуфаров Г. И. «Ж. прикл. химии», 1959, т. 32, с. 1221.
34. Кэй Дж., Лэби Т. Справочник физика-экспериментатора. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1949.
35. Jarry R. L., Miller H. C. J. Phys. Chem., 1956, v. 60, p. 1412.
36. Ruff O., Le Boucher L. Z. anorgan. Chem., 1934, Bd 219, S. 376.
37. Hildenbrandt D. L. J. Amer. Chem. Soc., 1958, v. 80, p. 4129.
38. Fischer J., Rudzitis E. J. Amer. Chem. Soc., 1959, v. 81, p. 6375.
39. Szibicciotti D., Keneshea F. J. J. Phys. Chem., 1959, v. 63, p. 295.
40. Рысс И. Г. Химия фтора и его неорганических соединений. М., Госхимиздат, 1956.
41. Palko A. A., Ryon A. D. J. Phys. Chem., 1958, v. 62, p. 319.
42. Сун Инь-Чжу, Морозов И. С. «Ж. неорган. химии», 1959, т. 4, с. 492.
43. Iodine pentafluoride. Freezing and boiling point, heat of vaporisation and Vapour pressure temperature relation.— J. Amer. Chem. Soc., 1954, v. 76, p. 4843 (Auth.: Rogers M. T., Speirs J. L., Thompson H. B., Papish M. B.)
44. Грачев Н. С., Кириллов П. Л. «Инж.-физ. журн.», 1960, т. 3, с. 62.
45. Wartenberg H., Schulz H. Z. Elektrochemie, 1921, Bd 27, S. 568.
46. Douglas T. B., Dever J. L. J. Res. Nat. Bur. Standards, 1954, v. 53, p. 81.
47. Makansi M. M., Muendel C. H. J. Phys. Chem., 1955, v. 59, p. 40.
48. Ситтинг М. Натрий, его производство, свойства и применения. Пер. с англ. М., Госатомиздат, 1961.
49. Weinstok B., Weaver E. E., Malm J. G. J. Inorg. and Nucl. Chem., 1959, v. 11, p. 104.
50. Wartenberg H., Bosse O. Z. Elektrochemie, 1922, Bd 28, S. 384.
51. West Estal D. J. Amer. Chem. Soc., 1959, v. 81, p. 29.
52. Hoffman C. J., Jolly W. H. J. Phys. Chem., 1957, v. 61, p. 1574.
53. Fairbrother F., Frith W. C. J. Chem. Soc., 1951, Nov., p. 3051.
54. Oliver G. D., Milton H. T., Grisard J. W. J. Amer. Chem. Soc., 1953, v. 75, p. 2827.
55. Hu J.-H., White D., Johnston H. L. J. Amer. Chem. Soc., 1953, v. 75, p. 5642.
56. Schnitzlein Q. O. J. Phys. Chem., 1952, v. 56, p. 233.
57. Ruff O., Clusius K. Z. anorgan. Chem., 1930, Bd 190, S. 267.
58. Jarry R. L. J. Phys. Chem., 1957, v. 61, p. 498.
59. Clegg H. P., Rowlinson J. S., Sutton J. R. Trans. Faraday Soc., 1955, v. 51, p. 1327.
60. Jenkins A. S., Chambers G. F. Ind. Engng Chem., 1954, v. 46, p. 2367.
61. 3,3-dimethyl-2-thiabutane: chemical thermodynamic properties and barriers to internal rotation.— J. Chem. Phys. 1962, v. 36, p. 406 (Auth.: Scott D. W., Good W. D., Todd S. S. e.a.)
62. Li J. C., Pitzer K. S. J. Amer. Chem. Soc., 1956, v. 78, p. 1077.
63. Douglas T. B., Dever J. L. J. Amer. Chem. Soc., 1954, v. 76, p. 4826.

КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЕЩЕСТВ И ВИРИАЛЬНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ

13.1. ВИРИАЛЬНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ

Продолжение табл. 13.1

Термодинамическое уравнение состояния определяется как соотношение экспериментальных P , V , T -данных, выраженное в произвольной аналитической форме:

$$f(P, V, T) = 0, \quad (13.1)$$

где P — давление; T — температура; V — мольный объем газа. Теоретическая форма изотермы уравнения состояния реального неонизованного газа имеет вид так называемого вириального разложения:

$$\frac{PV}{RT} = 1 + \frac{B(T)}{V} + \frac{C(T)}{V^2} + \frac{D(T)}{V^3} + \dots, \quad (13.2)$$

где R — универсальная газовая постоянная. Коэффициенты $B(T)$, $C(T)$, ... называются соответственно вторым, третьим и т. д. вириальными коэффициентами; они зависят только от температуры и полностью определяются температурой и потенциалами взаимодействия молекул газа. В частности.

$$B(T) = \frac{1}{2} \int_V (1 - e^{U(r)/kT}) dV,$$

где $U(r)$ — бинарный межмолекулярный потенциал; k — постоянная Больцмана. Аналогичные выражения для $C(T)$, $D(T)$, ... используются как для вычисления вириальных коэффициентов при известном межмолекулярном потенциале, так и для решения обратной задачи. В табл. 13.1 приведены значения второго вириального коэффициента для некоторых газов в зависимости от температуры.

Таблица 13.1

Второй вириальный коэффициент некоторых газов

$T, ^\circ K$	$B, \text{см}^3/\text{моль}$	$T, ^\circ K$	$B, \text{см}^3/\text{моль}$
Аг, аргон [1]			
84,80	—413,98	373,2	— 6,87
88,30	—381,69	398,2	— 1,59
92,31	—351,63	423,2	2,42
95,07	—333,50	447,2	6,18
101,41	—269,75	473,2	8,28
108,16	—266,10	573,2	17,88
133,16	—279,28	673,2	26,13
142,60	—156,10	773,2	29,48
150,66	—142,7	873,2	32,34
163,20	—121,62	F₂ фтор [2]	
176,70	—103,30	293,2	—21
188,20	— 91,03	400	—2,0
203,20	— 77,24	500	8,0
223,2	— 62,10	600	14
239,8	— 52,10	700	18
248,2	— 47,43	800	21
273,2	— 36,69	900	23
295,0	— 27,40	1000	25
298,2	— 26,60	1200	27
323,2	— 18,55	1400	28
348,2	— 12,24		

$T, ^\circ K$	$B, \text{см}^3/\text{моль}$	$T, ^\circ K$	$B, \text{см}^3/\text{моль}$
H₂, водород [2—4]		600	10,51
14	—255	700	10,32
16	—212	800	10,13
18	—181	1000	9,81
20	—156	1200	9,58
25	—114	³He, гелий-3 [5]	
30	— 87	0,2	—1350
35	— 69	0,4	— 672,5
40	— 56	0,6	— 446,7
45	— 50	0,8	— 333,8
50	— 38	1,0	— 266,0
55	— 30	1,2	— 220,9
60	— 24	1,4	— 188,6
65	— 19	1,6	— 164,4
300	12,1	1,8	— 145,6
400	12,3	2,0	— 130,6
500	14,4	2,2	— 118,2
600	15,0	2,4	— 108,0
700	15,7	2,6	— 99,3
800	16,4	2,8	— 91,8
900	16,7	3,0	— 85,4
1000	16,7	Кг, криптон [2,6]	
1200	16,7	107,55	—387
1400	16,6	109,94	—365
He, гелий [2,4]		112,28	—350
14	—11,5	115,35	—331
15	—10,5	118,50	—315
16	— 8,9	121,47	—302
17	— 7,5	128,14	—271
18	— 6,2	132,13	—255
19	— 5,1	138,07	—237
20	— 4,0	293,2	— 54
21	— 3,1	400	— 23
293,2	11,5	500	— 7,25
400	10,94		
500	10,72		

$T, ^\circ K$	$B, \text{см}^3/\text{моль}$	$T, ^\circ K$	$B, \text{см}^3/\text{моль}$
600	2,56	O_3 , озон [2]	
700	9,23	293,2	—107
800	14,01	500	— 28
900	17,6	900	14
1000	20,3	He , ксенон [2]	
1200	24,2	298,15	—130,8
1400	26,8	400	— 71
N_2 , азот [2]		500	— 39
298,2	—4,85	600	— 20
400	9,31	700	— 6,9
500	17,05	800	2,6
600	21,84	900	9,7
700	25,03	1000	15,3
800	27,26	1200	23
900	28,9	1400	28,5
1000	30	BCl_3 , треххлористый бор [2]	
1200	31,5	293,2	—398
1400	32,6	400	—231
Ne , неон [2]		500	—152
293,2	13,02	600	—105
400	12,47	700	— 72
500	13,19	800	— 49
600	13,62	900	— 31
700	13,77	1000	— 18
800	13,87	1200	1,4
900	13,91	1400	4,6
1000	13,88	BF_3 , трехфтористый бор [2]	
1200	13,75	298,2	—89,8
1400	13,61	400	—42,6
O_2 , кислород [2]		500	—17,1
293,2	—17	600	— 1,1
400	0,03	700	9,8
500	8,5	800	17,7
600	13,9	900	23,6
700	17,5	1000	28
800	20	1200	34
900	22	1400	39
1000	23	C_2N_2 , дициан [2]	
1200	25	298,2	—367
1400	26	400	—172
		500	— 66
		600	— 0,8
		700	44
		800	77
		900	101,4
		1000	120
		1200	146,6
		1400	164

$T, ^\circ K$	$B, \text{см}^3/\text{моль}$	$T, ^\circ K$	$B, \text{см}^3/\text{моль}$
CO , окись углерода [2]		1000	16,0
298,2	—8,88	1200	17,8
400	7,64	1400	18,8
500	16,57	N_2O , закись азота [2,7]	
600	22,14	273,2	—161
700	25,85	298,2	—133
800	28,49	398,2	— 68,4
900	30,39	600	— 9,9
1000	31,80	700	0,4
1200	33,48	800	7,9
1400	34,76	900	13,4
CO_2 , двуокись углерода [2]		1000	17,7
298,2	—94	1200	23,8
400	—49	1400	27,9
500	—25	SF_6 , шестифтористая сера [2]	
600	— 9,9	298,2	—281
700	0,4	400	—139
800	7,9	500	— 64
900	13,4	600	— 16
1000	17,7	700	16,4
1200	23,8	800	40
1400	27,9	900	57
H_2O , вода (пар) [2]		1000	70
400	—332	1200	90
500	—163	1400	102
600	— 98	SO_2 , двуокись серы [2]	
700	— 66	298,2	—524
800	— 47	400	—339
900	— 35	500	—123
1000	— 26	600	— 85
1200	— 15	700	— 61
1400	— 8	800	— 46
NH_3 , аммиак [2]		900	— 33
298,2	—285	1000	— 27
400	—120	1200	— 15
500	— 68	1400	— 8
600	— 46	SiF_4 , четырехфтористый кремний [2]	
700	— 30	298,2	—137
800	— 21	400	— 50
900	— 15	500	— 3
1000	— 10	600	26,5
1200	— 4,2	700	47
1400	— 0,38	800	61
NO , окись азота [2]		900	72
298,2	—17,3	1000	80
400	— 4,0	1200	92
500	3,4	1400	100
600	7,9		
700	11,0		
800	13,2		
900	14,8		

$T, ^\circ\text{K}$	$B, \text{см}^3/\text{моль}$	$T, ^\circ\text{K}$	$B, \text{см}^3/\text{моль}$
CH_4 , метан [2]		400,4	—353
298,2	—367	413,4	—322
400	—172	C_5H_{12} , пентан [8]	
500	—66	298,2	—1194
600	—0,8	306,1	—1117
700	45	318,1	—1011
800	77	329,0	—923
900	101	339,0	—863
1000	120	349,0	—800
1200	147	358,0	—758
1400	164	368,0	—701
C_2H_4 , этен (этилен) [2]		378,9	—652
298,2	—140	388,4	—612
400	—72	401,0	—578
500	—36	413,6	—517
600	—13	C_6H_{14} , гексан [8]	
700	2,5	313,5	—1676
800	14	318,1	—1637
900	22	324,0	—1496
1000	29	332,1	—1419
1200	38	338,5	—1326
1400	44	339,9	—1310
C_2H_2 , этин (ацетилен) [2]		342,4	—1289
298,2	—157	347,3	—1239
400	—87	354,0	—1194
500	—51	360,2	—1147
600	—28	368,0	—1075
700	—12	378,4	—981
800	—1,0	387,2	—913
900	7	398,3	—895
1000	14	413,1	—771
1200	23	C_7H_{16} , гептан [8]	
1400	19	349,4	—1819
C_3H_8 , пропан [8]		358,3	—1691
295,4	—399	368,5	—1560
306,5	—369	378,1	—1446
317,6	—339	384,1	—1325
327,6	—324	400,8	—1212
337,8	—299	413,7	—1108
347,9	—274	C_8H_{18} , октан [8]	
357,9	—265	373,0	—2122
368,2	—244	378,2	—2048
377,7	—229	383,2	—1939
388,5	—213	384,1	—1869
400,1	—201	388,2	—1829
412,9	—182	393,5	—1778
C_4H_{10} , бутан [8]		403,5	—1641
296,4	—720	413,5	—1518
307,5	—667	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$, метилформиат [9]	
318,2	—619	319,2	—840
328,9	—568	326,7	—760
337,8	—533	333,2	—710
348,4	—501	342,3	—660
358,4	—466	348,2	—640
368,4	—440	351,3	—610
377,9	—410	366,2	—550
387,6	—383	378,0	—500
		386,3	—470
		396,7	—440

$T, ^\circ\text{K}$	$B, \text{см}^3/\text{моль}$	$T, ^\circ\text{K}$	$B, \text{см}^3/\text{моль}$
$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$, метилацетат [9]		$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$, этилацетат [9]	
323,2	—1240	330,2	—1550
328,4	—1210	333,5	—1490
335,8	—1150	336,8	—1470
338,2	—1080	343,2	—1300
345,5	—1000	348,2	—1260
353,2	—960	353,2	—1240
359,8	—890	358,6	—1160
368,2	—850	368,2	—1080
374,3	—820	375,1	—1040
378,8	—810	383,6	—950
383,6	—785	390,2	—930
391,0	—740	398,7	—875
$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$, этилформиат [9]		$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$, пропилформиат [9]	
323,0	—1090	228,6	—1530
329,8	—1000	333,2	—1440
333,2	—960	337,6	—1390
337,7	—930	342,3	—1370
340,7	—875	347,4	—1270
348,3	—830	351,4	—1190
368,2	—730	361,1	—1140
382,0	—650	367,2	—1060
388,2	—625	377,1	—960
394,8	—590	385,0	—900
		397,1	—860
		400,1	—845
		$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$, метилпропионат [9]	
		228,6	—1610
		333,2	—1540
		339,6	—1455
		347,0	—1340

$T, ^\circ K$	$B, \text{см}^3/\text{моль}$	$T, ^\circ K$	$B, \text{см}^3/\text{моль}$
352,4	—1310	CF_2Cl_2 , дифтордихлорметан (фреон-12) [2]	
353,2	—1240		
360,8	—1230	298,2	—449
368,2	—1110	400	—264
381,7	—1070	500	—167,5
387,4	—940	600	—108
398,9	—905	700	—69
		800	—40
CF_4 , четырехфтористый углерод (фреон-14) [2, 10]		900	—18,4
		1000	—1,6
273,2	—111	1200	22,1
298	—88,3	1400	38,5
303	—84	CHFCl_2 , фтордихлорметан (фреон-21) [2]	
323	—70		
348	—56	298,2	—562,3
373	—43,5	400	—335
398	—33,2	500	—223
423	—24,4	600	—156
448	—16,8	700	—111
473	—10,1	800	—79
498	—4,25	900	—55,2
523	1,0	1000	—36,8
548	5,6	1200	—10,4
573	9,80	1400	—7,5
593	13,6	CHCl_3 , хлороформ [2]	
623	17,05		
700	26,03	298,2	—1354
800	34,9	400	—581
900	41,5	500	—348
1000	46,5	600	—241
1200	53,6	700	—181
1400	58,2	800	—142

$T, ^\circ K$	$B, \text{см}^3/\text{моль}$	$T, ^\circ K$	$B, \text{см}^3/\text{моль}$
900	—116	18	—22
1000	—96	19	—19
1200	—69,8	20	—17
1400	—52,5	21	—15
CH_3Cl , метил хлористый (фреон-40) [2]		50% Ar—50% Kr [6]	
298,2	—420	108	—236
400	—208	111	—225
500	—128	115	—208
600	—86	119	—198
700	—44	124	—186
800	—31,6	50% CO_2 —50% He [11]	
1000	—10		
1200	—1,8	303,2	21,6
1400	3,9	333,2	24,6
50% H_2 —50% He [11]		363,2	22,6
14	—38	50% CO_2 —50% Ar [11]	
15	—33	303,2	—31,8
16	—28	333,2	—25,8
17	—25	363,2	—19,6

13.2. ПАРАМЕТРЫ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ ПЕРЕХОДА ЖИДКОСТЬ — ПАР

Уравнение состояния (13.1) имеет единственную точку с параметрами $P_{\text{кр}}$, $T_{\text{кр}}$, $V_{\text{кр}}$, определяемую из условий

$$(\partial P / \partial V)_{\text{кр}} = (\partial^2 P / \partial V^2)_{\text{кр}} = 0.$$

Эта точка называется критической, а параметры — соответственно критическим давлением, критической температурой и критическим объемом. Критическая точка является одним из концов линии перехода жидкость — пар: при температурах выше критической переход жидкость — пар осуществляется без скачка плотности. Критическая точка характеризуется исчезновением мениска в капилляре, обращением в нуль теплоты испарения и обращением в бесконечность сжимаемости $(dV/dP)_m$. Критические параметры веществ приведены в табл. 13.2.

Помимо вириального разложения (13.2) для аппроксимации экспериментальных данных часто используют уравнение состояния Ван-дер-Ваальса:

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT,$$

коэффициенты которого связаны с параметрами критической точки:

$$a = (27/8) RT_{\text{кр}} b, \quad b = RT_{\text{кр}} / 8 P_{\text{кр}}.$$

Коэффициент b приблизительно равен учетверенному собственному объему молекул газа. За некоторыми исключениями (водород в органических соединениях и т. п.), для коэффициентов Ван-дер-Ваальса справедливы отношения аддитивности:

$$\sqrt{a_A} + \sqrt{a_B} = \sqrt{a_{AB}}; \quad b_A + b_B = b_{AB},$$

где a_A и b_A — коэффициенты Ван-дер-Ваальса для газа, состоящего из молекул типа A ; a_B и b_B — коэффициенты для газа, состоящего из молекул типа B ; a_{AB} и b_{AB} — коэффициенты для смеси этих газов.

Критические параметры и коэффициенты Ван-дер-Ваальса некоторых газов и смесей

Формула	Название	$P_{кр}, атм$	$T_{кр}, ^\circ K$	Критическая плотность $\rho_{кр}, г/см^3$	$V_{кр}, см^3/моль$	Литература	$a, \frac{Н \cdot М^4}{моль^2}$	$b, см^3/моль$
Элементы								
Ar	Аргон	48,0	150,71	0,531	75,2	[2, 12]	0,1344	32,213
Br ₂	Бром	102	584,15	1,18	135	[2, 13]	0,8947	58,758
Cl ₂	Хлор	76,1	417,15	0,573	124	[2, 12, 13]	0,6497	56,241
Cs	Цезий	145	2057 ± 40	—	311	[14]	—	—
F ₂	Фтор	55	144	—	—	[13]	0,1071	26,861
H ₂	Водород равновесный	12,8	33	0,032	61,8	[15]	0,0242	26,451
	» нормальный	12,797	33,244	0,031	64,99	[2, 13]	0,0245	26,653
	Параводород	12,759	32,976	—	—	[13]	0,0242	26,517
D ₂	Дейтерий равновесный	16,3	38,4	—	—	[2]	0,0257	24,170
	» нормальный	16,432	38,35	0,067	60,3	[2, 13]	0,0254	23,946
DH	Дейтеро-водород	14,645	35,908	0,048	62,8	[2, 13]	0,0250	25,1562
T ₂	Тритий нормальный	20,8	43,7	0,112	53,7	[2, 13]	0,0261	21,556
HT	Водород-тритий	16,4	38,3	—	60,3	[2]	0,0254	23,961
DT	Дейтеро-тритий	17,3	39,5	0,085	58,5	[2, 13]	0,0233	21,290
He	Гелий	2,26	5,20	0,0639	57,8	[2, 13, 15]	0,00338	23,606
³ He	Гелий-3	1,17	3,35	—	—	[13]	0,00272	29,376
Hg	Ртуть	1640 ± 50	1460 ± 20	5 (4,2)	48	[2, 10, 17]	—	—
I	Иод	—	826	—	—	[16]	—	—
K	Калий	160	2228 ± 330	—	209	[2]	—	—
Kr	Криптон	54,27	209,38	0,908	92,2	[2, 12, 13]	0,2295	39,584
Li	Литий	680	3200 ± 600	—	66	[14]	—	—
Na	Натрий	350	2570 ± 350	—	116	[14]	—	—
N ₂	Азот	33,54	126,25	0,311	90,1	[2, 16]	0,1350	38,620
Ne	Неон	26,86	44,43	0,484	41,7	[2, 12, 13]	0,2088	16,971
O ₂	Кислород	50,14	154,78	0,41	78	[13, 16]	0,1358	31,671
O ₃	Озон	54,6	261,05	0,54	89,4	[2, 13, 15]	0,3546	49,054
P	Фосфор	824	968	—	—	[2, 13]	0,3231	12,053
Rb	Рубидий	157	2093 ± 35	—	247	[14]	—	—
Rn	Радон	62,43	377,5	—	—	[13]	0,6485	62,038
S	Сера	116,0	1313	0,403	80	[2]	0,4051	111,421
Xe	Ксенон	57,64	289,74	1,155	119,5	[2, 12]	0,4365	54,405
Неорганические соединения								
BBr ₃	Трехбромистый бор	—	573,2	0,90	278	[18]	—	—
BCl ₃	Треххлористый бор	38,2	452	0,79	148	[2]	1,5196	121,399
BF ₃	Трехфтористый бор	49,2	260,9	—	—	[2]	0,3931	54,406
B ₂ H ₆	Дибораи	39,52	289,65	0,166	167	[2, 19]	0,6032	75,197
CO	Оксид углерода	34,529	132,91	0,301	93,06	[2, 16]	0,14536	39,492
CO ₂	Двуокись углерода	72,85	304,19	0,468	94,04	[2, 16]	0,36088	42,840
COS	Сероокись углерода	62	375,4	—	—	[2]	0,6458	62,122
CS ₂	Сероуглерод	78	552	0,44	170	[2, 16]	1,1099	72,608
C ₂ N ₂	Дициан	59	400	—	—	[2]	0,7705	69,558
FCIO ₃	Перхлорилфторид	53,0	368,32	—	—	[2]	0,7272	71,300
F ₂ O	Оксид фтора	48,9	215,15	0,562	97,6	[2, 13]	0,26896	45,140
GeCl ₄	Четыреххлористый германий	38,0	550	—	—	[18]	2,2618	148,498
HBr	Бромистый водород	84,0	362,95	0,825	98	[2, 12, 13]	0,4456	44,331
HCl	Хлористый водород	81,5	324,55	0,42	48	[2, 12, 13]	0,3672	40,857
HCN	Цианистый водород	53,5	456,65	0,195	138,6	[2]	1,1074	87,573
HF	Фтористый водород	55	144	0,29	69	[2, 13]	0,10712	26,861
HI	Иодистый водород	80	423	1,09	117	[2, 13]	0,6355	54,249
H ₂ O	Вода	218,39	647,3	0,32	56	[2, 13, 16]	0,5451	30,410
D ₂ O	Оксид дейтерия (тяжелая вода)	215,70	644,05	0,338	54,8	[2, 13, 19]	0,5464	30,634
H ₂ O ₂	Перекись водорода	214	730	—	—	[2]	0,7075	34,998
H ₂ S	Сероводород	88,9	373,6	0,349	97,7	[2, 12, 16]	0,4461	43,116
H ₂ Se	Селенистый водород	91,0	410,2	—	—	[18]	0,5251	46,225
NF ₃	Трехфтористый азот	44,72	233,9	—	—	[2]	0,3473	53,623
NH ₃	Аммиак	111,3	405,5	0,235	72,48	[2, 12]	0,4197	37,380
NO	Оксид азота	64	180	0,52	58	[2, 12]	0,14384	28,856
NOCl	Хлористый нитрозил	92,4	438,2	—	—	[18]	0,5898	48,603

Формула	Название	$P_{кр}, атм$	$T_{кр}, ^\circ K$	Критическая плотность $\rho_{кр}, г/см^3$	$V_{кр}, см^3/моль$	Литература	$a, \frac{Н \cdot м^4}{моль^2}$	$b, см^3/моль$
NO_2	Перекись азота	100	413	0,56	82	[2, 15]	0,4846	42,373
N_2H_4	Гидразин	145	653	—	—	[2]	0,8355	46,204
N_2O	Закись азота	71,7	309,7	0,457	96,3	[2, 16]	0,3801	44,316
N_2O_4	Двуокись азота	99	431,2	0,56	164	[18]	0,5336	44,687
PF_3	Трехфтористый фосфор	42,69	271,1	—	—	[2]	0,4891	65,154
PH_3	Фосфористый водород	64,5	324,4	0,30	113,5	[18]	0,4635	51,601
PH_4Cl	Хлористый фосфоний	72,7	322,2	—	—	[18]	0,4057	45,471
SF_4	Четырехфтористая сера	—	347	—	—	[2]	—	—
SF_6	Шестифтористая сера	37,113	318,7	0,751	194,3	[2]	0,7776	88,103
SO_2	Двуокись серы	77,8	430,7	0,524	122	[2]	0,6775	56,798
SO_3	Трехокись серы	83,8	491,4	0,633	126	[2]	0,8187	60,163
SbI_3	Трихлоридная сурьма	2,3	718,2	—	—	[18]	0,6372	32,036
SeF_4	Четырехфтористый селен	—	563	—	—	[18]	—	—
$SiCl_4$	Четыреххлористый кремний	37,1	506,8	—	—	[2, 18]	1,9670	140,153
$SiCl_3F$	Фтортрихлорсилан	35,3	438,4	—	—	[18]	1,5470	127,420
$SiCl_2F_2$	Дифтордихлорсилан	34,5	369,0	—	—	[18]	1,1214	109,736
SiF_3Cl	Трифторхлорсилан	34,2	308	—	—	[18]	0,7881	92,399
SiF_4	Четырехфтористый кремний	36,6	259,0	—	—	[2]	0,5207	72,594
SiH_4	Силан	47,8	269,6	—	—	[15, 18]	0,4320	57,867
$SnCl_4$	Четыреххлористое олово	37,0	591,8	0,742	351	[18]	2,6875	163,983
UF_6	Шестифтористый уран	45,5	503	1,39	—	[18]	1,5799	113,422
Органические соединения								
I. Углеводороды								
CH_4	Метан	45,8	190,7	0,162	99	[15, 18, 20, 21]	0,2256	42,719
C_2H_6	Этан	48,8	305,3	0,203	148	[15, 16, 20, 21]	0,5427	64,187
C_2H_4	Этен (этилен)	50,5	282	0,227	124	[15, 16]	0,4474	57,292
C_2H_2	Этин (ацетилен)	61,6	309	0,230	113	[15]	0,4403	51,454
C_3H_8	Пропан	42,0	368,8	0,225	200	[15, 18, 19, 20]	0,9200	90,081
C_3H_6	Пропен (пропилен)	45,6	365	0,233	181	[15, 18]	0,8301	82,123
C_3H_6	Циклопропан	54,2	397,1	—	—	[18]	0,8265	75,159
C_3H_4	Пропин (аллилен)	52,8	401	—	—	[19]	0,8653	77,920
C_3H_4	Пропадиен	—	393	—	—	[15]	—	—
C_4H_{10}	Бутан	37,5	426,2	0,228	255	[15, 18, 20]	1,3763	116,607
C_4H_{10}	Изобутан	36,0	408,1	0,221	263	[15, 18]	1,3143	116,297
C_4H_8	1-Бутен	39,7	419,6	0,234	240	[15]	1,2601	108,439
C_4H_8	2-Бутен	41	430	0,238	236	[15, 18]	1,2814	107,604
C_4H_8	2-Метилпропен	39,5	417,9	0,235	239	[15, 18]	1,2562	108,547
C_4H_6	1,3-Бутадиен (дивинил)	42,7	425	0,245	221	[15, 18]	1,2019	102,118
C_4H_6	1-Бутин (этилацетилен)	—	463,7	—	—	[15]	—	—
C_4H_6	2-Бутин (диметилацетилен)	—	488,7	—	—	[15]	—	—
C_5H_{12}	Пентан	33,3	470,4	0,232	311	[15, 18, 20]	1,8880	144,932
C_5H_{12}	2-Метилбутан	32,9	461,0	0,234	308	[15, 19]	1,8354	143,763
C_5H_{12}	2,2-Диметилпропан (неопентан)	31,6	433,8	0,238	303	[15, 19]	1,6920	140,846
C_5H_{10}	1-Пентен	40	474	—	—	[15]	1,5958	121,570
C_5H_{10}	2-Пентен	40,4	475,6	—	—	[15]	1,5907	120,771
C_5H_{10}	Изоамилен	33,9	464,8	—	—	[15]	1,8107	140,672
C_5H_{10}	2-Метил-2-бутен	34	470	—	—	[15]	1,8458	141,817
C_5H_{10}	Циклопентен	44,6	511,8	0,270	260	[15, 18]	1,8349	117,735
C_5H_{10}	Циклопентан	44,9	504	0,277	251	[18]	1,6074	115,166
C_5H_8	Пропилацетилен	—	493,5	—	—	[15]	—	—
C_6H_{14}	Гексан	29,9	508,0	0,234	368	[15, 18, 20]	2,4523	174,315
C_6H_{12}	Циклогексан	40,0	553	0,273	308	[15]	2,1722	141,843
C_6H_6	Бензол	48,6	562	0,304	260	[15, 19]	1,8465	118,642
C_7H_{16}	Гептан	27,01	540,2	0,235	426	[15, 18, 20]	3,0697	205,197
C_7H_8	Толуол	41,6	594	0,29	320	[15, 18]	2,4097	146,489

Формула	Название	$P_{кр}, атм$	$T_{кр}, ^\circ K$	Критическая плотность $\rho_{кр}, г/см^3$	$V_{кр}, см^3/моль$	Литература	$a, \frac{н \cdot м^4}{моль^2}$	$b, см^3/моль$
C_8H_{18}	Октан	24,6	569,4	0,233	490	[15, 18, 20]	3,7445	237,468
C_8H_{10}	о-Ксилол	36,9	631,6	0,28	379	[15, 18]	3,0715	175,603
C_9H_{20}	Нонан	22,86	595,4	0,236	543	[18, 20, 22]	2,7513	267,223
$C_{10}H_{22}$	Декан	21,24	619,3	0,236	602	[18, 20, 22]	5,1292	299,071
$C_{10}H_8$	Нафталин	39,3	742	0,314	408	[18]	3,9804	193,711
$C_{11}H_{24}$	Ундекан	19,32	642,6	0,237	659	[18, 20, 22]	6,0728	341,252
$C_{12}H_{26}$	Додекан	18,59	663,8	0,237	718	[18, 20, 22]	6,7346	366,352
$C_{12}H_{10}$	Дифенил	43	803,1	0,343	449	[19]	4,2615	191,611
$C_{13}H_{28}$	Тридекан	17,55	683,2	0,24	767	[18, 20, 22]	7,5567	399,404
$C_{14}H_{30}$	Тетрадекан	16,56	695	0,24	826	[18, 22]	8,2875	430,593
$C_{16}H_{32}$	Гектадекан	15,75	710,6	0,24	888	[18, 22]	9,1093	462,900
$C_{16}H_{34}$	Гексадекан	14	725,3	0,24	942	[18, 19]	10,6761	531,525
$C_{17}H_{36}$	Гептадекан	13	735,0	0,24	1001	[18, 19]	11,8070	580,068
$C_{18}H_{38}$	Октадекан	13	753,2	0,24	1059	[18]	12,4052	594,732
$C_{19}H_{40}$	Нонадекан	12	760	0,24	1118	[18]	13,6759	649,783
$C_{20}H_{42}$	Эйкозан	11	775	0,24	1176	[18]	15,5139	722,846
II. Кислородсодержащие соединения								
CS_2O	Фосген	56	445	0,52	190	[2]	1,0046	81,519
CH_4O	Метиловый спирт (метанол)	78,5	513,2	0,272	118	[15]	0,9532	67,074
C_2H_6O	Этиловый спирт (этанол)	63,0	516	0,276	167	[15]	1,2008	84,033
C_2H_6O	Диметиловый эфир	53	400,1	0,242	190	[15, 18]	0,8582	77,452
$C_2H_6O_2$	Этилгликоль	—	798	—	—	[23]	—	—
C_2H_4O	Ацетальдегид	—	461	—	—	[18]	—	—
C_2H_4O	Окись этилена	50,7	468	0,36	122	[18]	1,2273	94,696
$C_2H_4O_2$	Уксусная кислота	57,1	594,8	0,351	171	[15, 18]	1,7603	106,865
$C_2H_4O_2$	Метилформат	59,2	487,2	0,349	172	[15, 18]	1,1392	84,836
C_3H_8O	Пропиловый спирт (пропанол)	50,2	537	0,273	220	[15]	1,6320	109,742
C_3H_8O	Изопропиловый спирт (изопропанол)	53	508,8	0,274	219	[15]	1,3877	98,485
C_3H_8O	Метилэтиловый эфир	43,4	437,9	0,272	221	[15, 18]	1,0077	83,098
C_3H_6O	Ацетон	46,6	508,7	0,273	213	[15, 18]	1,5776	111,990
$C_3H_6O_2$	Пропионовая кислота	53	612	0,32	230	[15, 18]	2,0077	118,462
$C_3H_6O_2$	Метилацетат	46,3	506,9	0,325	228	[15, 18]	1,5766	112,316
$C_3H_6O_2$	Этилформат	46,8	508,5	0,323	229	[15, 18]	1,5697	111,467
$C_4H_{10}O$	Бутиловый спирт (бутанол)	50,6	561	—	—	[15, 19]	1,7670	113,740
$C_4H_{10}O$	Изобутиловый спирт (изобутанол)	48,0	538	—	—	[18]	1,7132	114,986
$C_4H_{10}O$	Диэтиловый эфир	35,6	467	0,265	281	[15, 18, 19]	1,7405	134,578
C_4H_8O	Метилэтилкетон	39,5	533	0,25	290	[15, 18]	2,0435	138,443
$C_4H_8O_2$	Масляная кислота	52	628	0,304	290	[15, 18]	2,1548	123,898
$C_4H_8O_2$	Изомасляная кислота	40	609	0,302	292	[15, 18]	2,6344	156,207
$C_4H_8O_2$	Пропилформат	40,1	538,1	0,309	285	[15, 18]	2,0514	137,666
$C_4H_8O_2$	Метилпропионат	39,3	530,5	0,312	282	[18]	2,0345	138,485
$C_4H_8O_2$	1,4-Диоксан	50,7	585	0,36	240	[15]	1,9176	118,372
$C_4H_6O_3$	Уксусный ангидрид	46,2	569	—	—	[15, 18]	1,9911	126,361
$C_4H_6O_4$	Диметилхалат	9,5	533	—	—	[18]	8,4966	575,632
$C_5H_{12}O$	Этилпропиловый эфир	32,1	500,6	0,260	339	[15, 18]	2,2182	160,003
C_6H_6O	Фенол	60,5	692,4	—	—	[15]	2,2600	117,420
C_7H_8O	m-Крезол	45,0	705	0,35	310	[15]	3,1380	160,727
C_7H_8O	Метилфеноловый спирт (анизол)	41,3	642	—	—	[18]	2,7644	155,497
$C_8H_{10}O$	Фенетол	33,8	647	—	—	[18]	3,5189	196,395
$C_{12}H_{10}O$	Дифениловый эфир	35,2	769	—	—	[19]	4,7731	224,133
III. Галогензамещенные углеводороды								
CF_4	Углерод четырехфтористый (фреон-14)	38,13	227	0,633	136	[2, 24]	0,386	61,268

Формула	Название	$P_{кр}$, атм	$T_{кр}$, °К	Критическая плотность $\rho_{кр}$, г/см ³	$V_{кр}$, см ³ /моль	Литература	a , $\frac{Н \cdot М^4}{моль^2}$	b , см ³ /моль
CF ₃ Cl	Трифторхлорметан (фреон-13)	39,36	301,9	0,580	218	[2, 24]	0,658	78,695
CF ₂ Cl ₂	Дифтордихлорметан (фреон-12)	39,6	384,6	0,555	218	[15, 24]	1,061	99,645
CFCl ₃	Фтортрихлорметан (фреон-11)	43,2	471,2	0,554	248	[15, 24]	1,460	111,899
CCl ₄	Углерод четыреххлористый	45	556,4	0,558	257	[2, 18]	1,955	126,847
CF ₂ Br ₂	Дифтордибромметан (фреон-12B2)	41,68	464	—	—	[2, 24]	1,468	114,217
CF ₂ Br	Трифторбромметан (фреон-13B1)	44,29	340	—	—	[24]	0,742	78,761
CF ₂ ClBr	Дифторхлорбромметан (фреон-12B1)	42,53	428	—	—	[24]	1,224	103,249
CHF ₃	Триформетан (фреон-23)	48,4	288,2	0,516	136	[24]	0,488	61,093
CHF ₂ Cl	Дифторхлорметан (фреон-22)	50,33	369,2	0,525	165	[24]	0,770	75,261
CHFC1 ₂	Фтордихлорметан (фреон-21)	52,7	451,6	0,522	197	[24]	1,099	87,919
CHCl ₃	Хлороформ	54	536,6	0,50	240	[2, 18]	1,515	101,942
CH ₂ F ₂	Диформетан	—	356	—	—	[2]	—	—
CH ₂ Cl ₂	Дихлорметан	60	510	—	—	[2]	1,2317	87,209
CH ₂ Br ₂	Дибромметан	70,6	583	0,525	165	[15]	1,3679	84,732
CH ₃ F	Фтористый метил	58,0	317,8	0,300	113	[2, 18]	0,4948	56,217
CH ₃ Cl	Хлористый метил (фреон-40)	65,9	416	0,353	143	[2, 16]	0,7461	64,766
C ₂ F ₄	Тетрафторэтилен	38,9	306,45	0,578	173	[2]	0,6861	80,825
C ₂ H ₂ F ₂	1,1-Дифторэтилен	40,7	303,2	0,435	147	[18]	0,6418	76,432
C ₂ F ₅ Br	Пентафторхлорэтан (фреон-115)	31	353	—	—	[24]	1,6539	116,923
C ₂ F ₄ Cl ₂	Тетрафтор-1,1-дихлорэтан (фреон-114)	32,6	418,6	0,582	276	[2]	1,5271	131,736
C ₂ F ₃ Cl ₃	Трифтортрихлорэтан (фреон-113)	34,65	487,0	0,576	325	[24]	1,9448	144,201
C ₂ H ₄ F ₂	1,1-Дифторэтан	44,4	386,6	0,365	181	[18]	0,9564	89,335
C ₂ H ₄ Cl ₂	1,2-Дихлорэтан	53	561	0,44	220	[15]	1,6872	108,600
C ₂ H ₃ F ₂ Cl	1,1-Дифтор-1-хлорэтан (фреон-142)	40,7	410,2	0,435	231	[18]	1,1746	103,395
C ₂ H ₃ F ₃	1,1,1-Трифторэтан (фреон-143)	42	346,2	0,434	194	[24]	0,8108	84,570
C ₃ H ₆ Cl ₂	Гексафтордихлорпропан (фреон-216)	28,9	449	0,62	356	[24]	1,9820	159,401
C ₄ F ₁₀	Перфторбутан (фреон-31-10)	24,75	386	0,63	378	[24]	1,7105	160,012
C ₄ F ₈	Октафторциклобутан (фреон-ФС-318)	28,6	388,6	—	—	[19]	1,5002	139,405
C ₆ H ₅ F	Фторбензол	44,6	559,8	0,354	271	[15]	1,9964	128,777
C ₆ H ₅ Cl	Хлорбензол	46,1	632,4	0,365	208	[15, 19]	2,4649	140,745
C ₆ H ₅ Cl ₃	1,2,4-Трихлорбензол	39,3	735,0	0,472	384	[18]	3,9057	191,883
C ₆ H ₄ Cl ₂	o-Дихлорбензол	40,5	697	0,408	360	[18]	3,4082	176,571
C ₆ F ₁₂	Перфторметилциклогексан	24	486,6	—	—	[15]	2,8032	208,019
C ₇ H ₅ F ₃	Бензотрифторид	35,1	562,6	0,427	342	[18]	2,5620	164,440
C ₇ F ₁₆	Перфторгептан	16,0	474,8	0,584	664	[15]	4,0033	304,462
IV. Азот- и серосодержащие углеводороды								
CH ₃ N	Метиламин	73,6	430,1	0,223	254	[15]	0,7141	59,956
C ₂ H ₅ N	Диэтиламин	36,6	496	0,246	297	[15, 18]	1,9098	139,041
C ₆ H ₇ N	Анилин	52,4	698,8	0,314	274	[15, 18]	2,6478	136,824
CH ₃ S	Метилмеркаптан	71,4	470,0	0,323	149	[18]	0,8790	67,537
C ₆ H ₅ S	Тиофен	48	590	0,34	247	[18]	2,0605	126,110
Смеси								
	Воздух	37,2	413,8	0,35	—	[12]	1,3078	114,127
	Даутерм (42%-добензил; 58%-нафталин)	—	801	—	—	[23]	—	—
	Даутерм (73,5%-дифениловый эфир; 26,5%-дифенил)	41	801	—	—	[19]	4,4462	200,432

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Rossi J. C., Danon F. Disc. Faraday Soc., 1965, v. 40, p. 97.
- Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочник. Под ред. В. П. Глушко. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1962.
- Кнаар Н. Ф. Р. Physica, 1962, v. 28, p. 21.
- Varekamp F. H., Beenakker J. J. M. Physica, 1959, v. 25, p. 889.
- Sherman R. H., Sydoriak S. G., Roberts T. R. J. Res. Nat. Bur. Standards, 1964, v. 68A, p. 579.
- Fender B. E. F., Haisey G. D. J. Chem. Phys., 1962, v. 36, p. 1881.
- Schamp H. W., Mason E. A., Su K. Phys. Fluids, 1962, v. 5, p. 772.

8. McGlashan M. L., Potter D. J. B. Proc. Roy. Soc., 1962, v. A267, p. 478.
9. Lambert J. D. Proc. Roy. Soc., 1959, v. A249, p. 414.
10. Douslin D. R. J. Chem. Phys., 1961, v. 35, p. 1364.
11. Cottrell T. L., Hamilton R. A. Trans. Faraday Soc., 1956, v. 52, part 2, p. 156; 1956, v. 52, part 10, p. 1311.
12. Pickering S. A Review of the literature relating to the critical constants. Washington, 1926.
13. Термические константы веществ. Справочник. Под ред. В. П. Глушко. Вып. 1. М., Изд-во АН СССР, 1965.
14. Dillon J. G., Nelson P. A., Swanson B. S. J. Chem. Phys., 1966, v. 44, p. 4229.
15. Kote K. A., Lynn R. E. Chem. Revs, 1953, v. 52, p. 117.
16. Smithsonian Physical Tables. 9th ed. Washington, 1954.
17. Киконн И. К., Сенченков А. П. «Физика металлов и металловедение», 1967, т. 24, с. 843.
18. Справочник химика. Под ред. Б. П. Никольского. Т. 2. М.—Л., «Химия», 1963.
19. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963.
20. Varshni Y. P. J. Chem. Phys., 1953, v. 21, p. 2335.
21. Mitra S. S. J. Chem. Phys., 1953, v. 21, p. 2334.
22. Kurata M., Isida K. J. Chem. Phys., 1955, v. 23, p. 1127.
23. Строение и физические свойства вещества в жидком состоянии. Киев. Изд. Киевск. ун-та, 1962.
24. Яковкин Г. А. Фреоны. Свойства и применения. Л., Изд. ГИПХ, 1959.

ГЛАВА 14

КОЭФФИЦИЕНТ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ

Коэффициент поверхностного натяжения жидкости σ равен работе, необходимой для увеличения поверхности жидкости на единицу площади при постоянной температуре, и зависит не только от свойств самой жидкости, но и от свойств среды, с которой жидкость граничит. Зависимость σ жидкости от температуры выражается равенством [1]

$$d\sigma/dT = -B(\rho/\mu)^{2/3},$$

где ρ — плотность; μ — молекулярная масса; $B = 2,1 \text{ э·см}^2/(\text{сек}^2 \cdot \text{град})$.

Коэффициент поверхностного натяжения твердого тела также определяется как работа образования единицы площади поверхности. Иногда вместо поверхностного натяжения экспериментально определяется работа адгезии, представляющая собой работу против сил притяжения при разделении граничащих тел. В случае, когда твердое тело граничит с жидкостью, работа адгезии $W_{\text{тж}} = \sigma_{\text{тл}} + \sigma_{\text{жг}} - \sigma_{\text{тж}}$, где $\sigma_{\text{тл}}$ и $\sigma_{\text{тж}}$ — поверхностные натяжения на границах твердого тела соответственно с газом и жидкостью; $\sigma_{\text{жг}}$ — поверхностное натяжение жидкости на границе с газом.

14.1. ЖИДКОСТИ

Таблица 14.1

Коэффициент поверхностного натяжения элементов в жидком состоянии

Вещество		Газовая среда	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \text{эрг/см}^2$	Литература
Наименование	Символ				
Алюминий	Al	—	$t_{\text{пл}}$	914	[2]
Барий	Ba	—	$t_{\text{пл}}$	330	[3]
Бериллий	Be	—	$t_{\text{пл}}$	1145	[4]
Бром	Br	Воздух	—21	62,1	[6]
		»	13,0	44,1	[6]
Ванадий	V	—	$t_{\text{пл}}$	1750	[3]
Висмут	Bi	—	$t_{\text{пл}}$	390	[5]
		CO ₂	264	429,5	[6]
		CO ₂	265	464,9	[6]
		H ₂	300	388	[7]
		H ₂	962	340	[7]
		Вакуум	293	389,0	[7]

Продолжение табл. 14.1

Вещество		Газовая среда	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \text{эрг/см}^2$	Литература
Наименование	Символ				
Висмут	Bi	Вакуум	365	300	[6]
		»	600	343,0	[7]
Вольфрам	W	—	$t_{\text{пл}}$	2300	[8]
Гадолиний	Gd	—	$t_{\text{пл}}$	650	[3]
Галлий	Ga	—	$t_{\text{пл}}$	707	[9]
Гафний	Hf	—	$t_{\text{пл}}$	1460	[10]
Германий	Ge	—	$t_{\text{пл}}$	600	[11]
Гольмий	Ho	—	$t_{\text{пл}}$	650	[3]
Диспрозий	Dy	—	$t_{\text{пл}}$	640	[3]
Европий	Eu	—	$t_{\text{пл}}$	450	[3]
Железо	Fe	—	$t_{\text{пл}}$	1840	[3]
		—	1550	1788	[12]
		Воздух	$t_{\text{пл}}$	949,7	[6]
		—	—997	—	
		H ₂	1267	936	[7]
Золото	Au	—	$t_{\text{пл}}$	1134	[13]
		Воздух	700	1207	[14]
		»	1070	612,2	[6]
		H ₂	1120	1128	[14]
Индий	In	—	$t_{\text{пл}}$	559	[15]
Иридий	Ir	—	$t_{\text{пл}}$	2400	[3]
Иттербий	Yb	—	$t_{\text{пл}}$	450	[3]
Иттрий	Y	—	$t_{\text{пл}}$	900	[3]
Кадмий	Cd	—	$t_{\text{пл}}$	558	[13]
		CO ₂	$t_{\text{пл}}$	815,2	[6]
		CO ₂	312	832,4	[6]
		H ₂	336	570	[7]
		H ₂	600	585	[7]
		Вакуум	350	546,4	[6]
		»	355	636,9	[7]
		»	589	589,9	[7]
Калий	K	—	$t_{\text{пл}}$	101	[12]
		CO ₂	62	411,5	[6]
Кальций	Ca	—	$t_{\text{пл}}$	420	[3]
Кобальт	Co	—	$t_{\text{пл}}$	1870	[16]
		—	1550	1886	[12]
Кремний	Si	—	$t_{\text{пл}}$	860	[17]
Лантан	La	—	$t_{\text{пл}}$	700	[3]
Литий	Li	—	$t_{\text{пл}}$	398	[12]

Продолжение табл. 14.1

Вещество		Газовая среда	t, °C	σ , эрг/см^2	Литература
Наименование	Символ				
Лютеций	Lu	—	$t_{\text{пл}}$	950	[3]
Магний	Mg	—	$t_{\text{пл}}$	569	[18]
Марганец	Mn	—	$t_{\text{пл}}$	1750	[3]
Медь	Cu	—	$t_{\text{пл}}$	1351	[19]
		Воздух	$t_{\text{пл}}$	581	[6]
		H ₂	1140	1120	[14]
		H ₂	1335	1251	[14]
Молибден	Mo	—	$t_{\text{пл}}$	2050	[3]
Натрий	Na	—	$t_{\text{пл}}$	191	[12]
		CO ₂	90	293,6	[6]
		Вакуум	100	222	[7]
		»	258	211	[7]
Неодим	Nd	—	$t_{\text{пл}}$	680	[3]
Никель	Ni	—	$t_{\text{пл}}$	1810	[16]
		—	1550	1934	[20]
Ниобий	Nb	—	$t_{\text{пл}}$	2150	[3]
Олово	Sn	—	$t_{\text{пл}}$	554	[21]
		CO ₂	226	612,4	[6]
		Вакуум	247	539,8	[6]
		»	250	575,1	[6]
		»	600	505,6	[6]
		H ₂	253	526	[7]
		H ₂	964	514	[7]
		Воздух	259	652,7	[6]
		»	408	616,4	[6]
Осмий	Os	—	$t_{\text{пл}}$	2600	[3]
Палладий	Pd	—	$t_{\text{пл}}$	1600	[3]
Платина	Pt	—	$t_{\text{пл}}$	1740	[22]
		—	1800	1699	[20]
		—	2000	1819	[6]
Прозеродим	Pr	—	$t_{\text{пл}}$	690	[3]
Радий	Ra	—	$t_{\text{пл}}$	450	[3]
Рений	Re	—	$t_{\text{пл}}$	2500	[3]
Родий	Rh	—	$t_{\text{пл}}$	2050	[3]
Ртуть	Hg	—	$t_{\text{пл}}$	478	[23]
		Воздух	17,5	547,2	[6]
		»	18	505	[6]
		O ₂	18	504	[6]
		N ₂	18	495	[6]
		CO ₂	18	487	[6]
		H ₂	18	554	[6]
		CO ₂	19	473,2	[7]
		CO ₂	201	429,1	[7]
		Вакуум	15	436,3	[7]
		Пар	12,5	438,4	[14]
		»	20	471,6	[6]
		»	15	435,6	[6]
		Пар	67,0	423,9	[14]
Рубидий	Rb	—	$t_{\text{пл}}$	90	[3]
Рутений	Ru	—	$t_{\text{пл}}$	2050	[3]
Самарий	Sm	—	$t_{\text{пл}}$	620	[3]
Свинец	Pb	—	$t_{\text{пл}}$	480	[15]

Продолжение табл. 14.1

Вещество		Газовая среда	t, °C	σ , эрг/см^2	Литература
Наименование	Символ				
Свинец	Pb	CO ₂	325	509,5	[6]
		CO ₂	330	535,9	[6]
		CO ₂	335	473	[6]
		H ₂	350	453	[7]
		H ₂	750	423	[7]
		H ₂	982	414	[7]
		H ₂	1036	397	[7]
		Вакуум	370	465,4	[7]
		»	377	394,2	[6]
		»	657	415,5	[7]
Селен	Se	—	$t_{\text{пл}}$	106	[3]
		Воздух	217	92,5	[6]
Сера	S	»	141	58,3	[6]
Серебро	Ag	—	$t_{\text{пл}}$	930	[24]
		Воздух	1000	782,4	[6]
		—	1000	751	[6]
		H ₂	995	923	[14]
		—	1163	902	[14]
Скандий	Sc	—	$t_{\text{пл}}$	800	[25]
Стронций	Sr	—	$t_{\text{пл}}$	350	[3]
Сурьма	Sb	—	$t_{\text{пл}}$	384	[26]
		CO ₂	432	317,2	[6]
		H ₂	640	350	[7]
		H ₂	970	342	[7]
		H ₂	750	368	[7]
		H ₂	1100	348	[7]
		Вакуум	640	367	[7]
Таллий	Tl	—	$t_{\text{пл}}$	490	[27]
		Вакуум	300	357	[14]
		—	320	496	[14]
Тантал	Ta	—	$t_{\text{пл}}$	2400	[3]
Тербий	Tb	—	$t_{\text{пл}}$	650	[3]
Титан	Ti	—	$t_{\text{пл}}$	1390	[10]
Торий	Th	—	$t_{\text{пл}}$	1050	[3]
Туллий	Tu	—	$t_{\text{пл}}$	620	[3]
Уран	U	—	$t_{\text{пл}}$	1300	[3]
Фосфор	P	CO ₂	$t_{\text{пл}}$	52,3	[6]
Хром	Cr	—	$t_{\text{пл}}$	1590	[28]
Цезий	Cs	—	$t_{\text{пл}}$	60	[3]
		—	62	67,5	[29]
		—	146	62,9	[29]
		—	152	62,1	[29]
Церий	Ce	—	$t_{\text{пл}}$	680	[3]
Цинк	Zn	—	$t_{\text{пл}}$	810	[13]
		Воздух	360	967,4	[6]
		Вакуум	470	772,2	[7]
		»	635	728,1	[7]
		H ₂	510	785	[14]
		H ₂	600	787	[7]
		H ₂	640	761	[14]
		H ₂	700	763	[7]
Цирконий	Zr	—	$t_{\text{пл}}$	1400	[10]
Эрбий	Er	—	$t_{\text{пл}}$	620	[3]

Коэффициент поверхностного натяжения воды * [6]

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\sigma, \text{эрг/см}^2$	75,62	74,11	72,58	71,03	69,41	67,79	66,04	64,27	62,50	60,68	58,80

* При 20°C коэффициент поверхностного натяжения D_2O $\sigma = 67,8 \text{ эрг/см}^2$ [14]

Таблица 14.3

Коэффициент поверхностного натяжения ртути [6]

$t, ^\circ\text{C}$	20	40	60	80	100	120	140	160	180
$\sigma, \text{эрг/см}^2$	471,6	468,2	464,4	460,5	456,2	452,0	447,2	442,0	436,8

Продолжение табл. 14.3

$t, ^\circ\text{C}$	200	220	240	260	280	300	320	340	360
$\sigma, \text{эрг/см}^2$	431,2	425,2	419,0	412,7	406,4	399,5	392,3	384,6	376,4

Таблица 14.4

Коэффициент поверхностного натяжения сжиженных газов [14]

Вещество	Формула	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \text{эрг/см}^2$	Вещество	Формула	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \text{эрг/см}^2$
Азот	N_2	—203,1 —196,0	10,53 8,7	Метиловый эфир	$(\text{CH}_3)_2\text{O}$	—40,1	21,0
Аммиак	NH_3	—29	41,2	Неон	Ne	—248,4	5,61
Аргон	Ar	—188,1	13,2	Оксид азота	NO	—163,0	27,79
Ацетилен	C_2H_2	—78,1	18,2	Оксид углерода	CO	—203,1	12,11
Водород	H_2	—252,8	2,13	Оксид этилена	$(\text{CH}_2)_2\text{O}$	—50,1	35,8
Гелий	He	—271,6	0,354	Сернистый газ	SO_2	—50,57	37,20
Диметиламин	$(\text{CH}_3)_2\text{NH}$	—78	25,20	Триметиламин	$(\text{CH}_3)_3\text{N}$	—25	32,6
Закись азота	N_2O	—89,3	26,3	Углекислый газ	CO_2	—73	24,8
		—50	14,39	Фтористый водород	HF	—52,2	16,54
Кислород	O_2	—203,1	18,3	Хлор	Cl_2	—81,8	17,60
		—182,9	13,2	Этиламин	$(\text{C}_2\text{H}_5)\text{NH}_2$	—72	33,0
Метиламин	CH_3NH_2	—70	29,2			—74	28,9

Таблица 14.5

Продолжение табл. 14.5

Коэффициент поверхностного натяжения
неорганических соединений в жидком состоянии [6]

Вещество	Формула	Газо- вая среда	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \text{эрг/см}^2$
Азотноватый ангид- рид	N_2O_4	Пар	1,6 19,8	29,52 26,56
Бария хлорид	BaCl_2	»	$t_{\text{пл}}$	150,5
		—	$t_{\text{пл}}$	171
Висмута бромид	BiBr_3	—	250,0	66,5
			442,0	46,2
» хлорид	BiCl_3	—	271,0	66,2
		—	382,0	52,0
Калия бихромат	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	Азот	420	140,1
		»	535	135,0
» бромид	KBr	»	775	85,7
		»	920	75,4
» вольфрамат	K_2WO_4	»	925,0	161,0
		»	1520,3	105,6
» иодид	KI	»	737	75,2
		»	873	66,5
» метаборат	KBO_3	»	992	124
		»	1142	97
» метафосфат	KPO_3	»	897	155,5
		»	1536,0	100,3
» молибдат	K_2MoO_4	»	930,6	150,5
		»	1522,3	112,5
» нитрат	KNO_3	»	380,0	110,4
		»	771,6	80,2
» сульфат	K_2SO_4	»	1070,6	143,7
		»	1656,0	106,8
» фторид	KF	»	912,7	138,4
		»	1310	104,9
» хлорид	KCl	»	799,5	95,8
		»	1167	69,6

Вещество	Формула	Газо- вая среда	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \text{эрг/см}^2$
Калия цианид	KCN	Во- здух	$t_{\text{пл}}$	96
Кальция хлорид	CaCl_2	»	$t_{\text{пл}}$	98,7
Лития карбонат	Li_2CO_3	»	$t_{\text{пл}}$	152,5
» метаборат	LiBO_2	Азот	879,2	261,8
		»	1520	192,4
» метасиликат	Li_2SiO_3	»	1254	374,6
		»	1601	346,6
» нитрат	LiNO_3	»	358,5	111,5
		»	609,4	96,2
» сульфат	Li_2SO_4	»	860	223,8
		»	1214	200,3
» фторид	LiF	»	868,5	249,5
		»	1270	201,1
» хлорид	LiCl	»	614,0	137,8
		»	1074,6	104,6
Мышьяка трибромид	AsBr_3	»	49,6	49,6
		»	179,7	36,1
» трихлорид	AsCl_3	»	—21,0	43,8
		»	110,0	31,0
Натрия ацетат	NaCH_3COO	Во- здух	$t_{\text{пл}}$	38,8
» аммониевый фо- сфат	$\text{Na}(\text{NH}_4)\text{HPO}_4$	»	$t_{\text{пл}}$	207,8
» бромид	NaBr	Азот	760,9	105,8
		»	1165,7	78,0
» вольфрамат	Na_2WO_4	»	710	203,3
		»	1595	142,6
» иодид	NaI	—	705,5	85,6
		—	860,7	77,6

Вещество	Формула	Газо- вая среда	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \text{эрг/см}^2$
Натрия карбонат	Na_2CO_3	Во- здух	$t_{\text{пл}}$	179,0
» метаборат	NaBO_2	Азот	1015,6	193,7
» метафосфат	NaPO_3	»	1441	126,2
» молибдат	Na_2MoO_4	»	827	197,5
» нитрат	NaNO_3	»	1516,5	147,5
» сульфат	Na_2SO_4	»	698,5	214,0
» тетраборат	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	»	1212	174,6
» фторид	NaF	»	321,5	119,7
» хлорид	NaCl	»	738,5	93,7
Олова дихлорид	SnCl_2	»	900	194,8
Рубидия бромид	RbBr	»	1077	184,7
» иодид	RbI	»	1000	211,9
» нитрат	RbNO_3	Во- здух	—	1010
» сульфат	Rb_2SO_4	»	1546	143,5
» фторид	RbF	»	802,6	113,8
» хлорид	RbCl	»	1171,8	88,0
Свинца и калия хлорид	$\text{PbCl}_2 \cdot \text{KCl}$	Азот	307	97,0
Серебра бромид	AgBr	»	480	81,6
» хлорид	AgCl	»	729,2	87,7
Серы монохлорид	S_2Cl_2	»	1121	60,6
Стронция хлорид	SrCl_2	»	673,4	79,4
Таллия нитрат	TlNO_3	»	1016	55,4
Фосфора оксихлорид	POCl_3	»	326,5	107,5
» трибромид	PBr_3	»	726,2	77,7
» триодид	PI_3	»	1086	132,5
» трихлорид	PCl_3	»	1545	108,9
Цезия иодид	CsI	»	802,6	127,2
» нитрат	CsNO_3	»	1085,4	102,2
» сульфат	Cs_2SO_4	»	750	95,7
» фторид	CsF	»	1150	61,4
» хлорид	CsCl	»	1150	61,4

Коэффициенты поверхностного натяжения органических соединений в жидком состоянии [6]

Вещества приведены в порядке возрастания числа атомов углерода

Вещество	Формула	Газо- вая среда	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \text{эрг/см}^2$
Муравьиная кислота	CH_2O_2	Пар	16,8	37,47
Хлороформ	CHCl_3	N_2	25,0	26,2
Метиловый спирт	CH_3O	Пар	20	23,02
Метиламин	CH_5N	N_2	-12	21,7
Четыреххлористый углерод	CCl_4	Пар	20	25,68
Формамид	CH_3ON	Воздух	34,5	55,53
Уксусная кислота	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	Пар	20	23,46
Диметиламин	$\text{C}_2\text{H}_7\text{N}$	N_2	-78,0	25,2
Хлораль	C_2HClO_3	Пар	19,4	24,48
Иодистый этил	$\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$	»	19,1	30,0
Бромистый этилен	$\text{C}_2\text{H}_4\text{Br}_2$	»	12,2	38,91
Хлористый этилен	$\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$	N_2	29,9	30,1
Этиламин	$\text{C}_2\text{H}_7\text{N}$	N_2	9,9	20,4
Этиловый спирт	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	Пар	20	22,03
Четырехбромистый ацетилен	$\text{C}_2\text{H}_2\text{Br}_4$	N_2	30,4	46,7
Четыреххлористый ацетилен	$\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_4$	N_2	47,4	30,5
Хлористый ацетил	$\text{C}_2\text{H}_3\text{OCl}$	Пар	14,8	25,79
Ацетонитрил	$\text{C}_2\text{H}_3\text{N}$	Воздух	13,8	29,18
Ацетон	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	Пар	16,8	23,35
Этилсульфоцианат	$\text{C}_3\text{H}_5\text{SN}$	»	17,6	35,52
Аллиловый спирт	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	»	14,8	25,99
Глицерин	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	Воздух	18,0	64,7
Этилацетат	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	N_2	25,1	22,2
Этиловый эфир	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	N_2	25,3	16,7
Цианистый этилен	$\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_2$	Воздух	80,1	34,32
Диэтиламин	$\text{C}_4\text{H}_{11}\text{N}$	N_2	23,4	18,3
Ацетилацетон	$\text{C}_4\text{H}_7\text{O}_2$	N_2	25,2	29,2
Фурфурол	$\text{C}_5\text{H}_4\text{O}_2$	N_2	0	43,5
Пиридин	$\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$	Пар	17,5	36,69
Анилин	$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	»	19,5	40,84
Бензол	C_6H_6	Воздух	17,5	29,16
Бромбензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Br}$	N_2	35,6	35,2
Хлорбензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	N_2	25,0	32,9
Циклогексан	C_6H_{12}	Воздух	11,9	27,98
Гексан	C_6H_{14}	Пар	8,2	18,54
Иодид бензола	$\text{C}_6\text{H}_5\text{I}$	N_2	25,4	37,1
Капронитрил	$\text{C}_6\text{H}_{11}\text{N}$	N_2	47,9	23,1
Толуол	C_7H_8	Воздух	17,5	28,52
Бензонитрил	$\text{C}_7\text{H}_5\text{N}$	Пар	8,0	39,61
Ацетофенон	$\text{C}_8\text{H}_8\text{O}$	N_2	24,8	40,1
Этиланилин	$\text{C}_8\text{H}_{11}\text{N}$	Пар	7,4	37,26
Октан	C_8H_{18}	»	15,5	21,31
Хинолин	$\text{C}_9\text{H}_7\text{N}$	»	10,5	47,34
Нафталин	C_{10}H_8	»	127,0	27,98
Кровь	—	Воздух	37,0	45,4
Масло арахисовое ($\rho=0,9149 \text{ г/см}^3$)	—	»	18,0	32,77
Масло цитроновое ($\rho=0,8197 \text{ г/см}^3$)	—	»	25,0	26,9

Таблица 14.7

Коэффициент поверхностного натяжения
с. эрг/см², циклогексана при различных давлениях
водорода [30]

Р. атм	t, °C				
	20	25	50	75	100
1	25,3	24,7	21,9	19,1	—
50	23,7	23,2	20,4	17,7	15,1
100	22,5	22,0	19,3	16,6	14,0
150	21,5	21,0	18,4	15,9	13,4
200	20,7	20,25	17,8	15,4	13,0
300	19,2	18,75	16,5	14,3	12,1

Таблица 14.8

Коэффициент поверхностного натяжения сплавов
в жидком состоянии в водороде [7, 14]

Сплав	t, °C	σ, эрг/см ²
81% Au — 19% Cu	1250	1097
51% Au — 49% Cu	1250	1123
71,9% Ag — 28,1% Cu	1125	1027
19% Ag — 81% Cu	1130	1114
85% Cu — 15% Sb	1100	797
24% Cu — 76% Sb	1100	405
82% Cu — 18% Sn	1000	922
25% Cu — 75% Sn	1000	538
87,3% Bi — 12,7% Sn	1000	339
15% Bi — 85% Sn	1000	449
48,7% Bi — 51,3% Pb	1000	352
10% Bi — 90% Pb	1000	388

14.2. ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

Таблица 14.9

Коэффициенты поверхностного натяжения
твердых тел [11, 29]

Вещество	Формула	t, °C	σ, эрг/см ²
Бария сульфат	BaSO ₄	25	1250
Воск пчелиный	—	—	46
Калия бромид	KBr	—	91,6
» иодид	KI	—	74,0
» хлорид	KCl	—	107,5
Кальция фторид	CaF ₂	30	2500
Натрия бромид	NaBr	—	118,7
» иодид	NaI	—	95,9
» хлорид	NaCl	—	150,2
Парафин	—	—	40,4
Свинца иодид	PbI ₂	30	130
» фторид	PbF ₂	25	900
Серебра хромат	Ag ₂ CrO ₄	26	575
Соль каменная	—	—	315
Стекло	—	—	130
Стронция сульфат	SrSO ₄	30	1400

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киконн И. К., Киконн А. К. Молекулярная физика. М., Физматгиз, 1963.
2. Peizel E. Berg- und Hüttenmann. Monatsh., 1948, Bd 93, S. 278.
3. Еременко В. Н. «Укр. хим. журн.», 1962, т. 28, с. 4; Еременко В. Н., Иващенко Ю. Н., Богатыренко Б. Б. Поверхностные явления в расплавах и их роль в процессах порошковой металлургии. Киев, Изд-во АН УССР, 1961.
4. Еременко В. Н., Ниженко В. И., Тай Шоу-вей. — «Изв. АН СССР. ОТН. Металлургия и топливо», 1960, т. 3, с. 116.
5. Семенченко В. К. Поверхностные явления в металлах и сплавах. М., Гостехиздат, 1957.
6. Landolt-Börnstein. Physikalisch-Chemische Tabellen, Bd 1, Berlin, 1923, S. 198.
7. Landolt-Börnstein. Physikalisch-Chemische Tabellen, Bd 2. Ergänzungsband, Berlin, 1931, 1 Teil, S. 148.
8. Calvery A. Proc. Phys. Soc. (B), 1957, v. 70, p. 1040.
9. Mack D. L., Davis J. K., Bartell F. E. J. Phys. Chem., 1941, v. 45, p. 846.
10. Surface Tension of Titanium, Zirconium and Hafnium. G. Appl. Phys., 1958, v. 29, p. 213. (Auth.: Peterson A. W., Hedgesdy H., Keck P. H., Schwartz E.)
11. Keck P. H., Van Horn W. Phys. Rev., 1955, v. 91, p. 512.
12. Taylor J. W. Philos. Mag., 1955, v. 46, p. 867.
13. Куниа Л. Л. Поверхностные явления в металлах. М., Металлургиздат, 1955.
14. Landolt-Börnstein. Physikalisch-Chemische Tabellen, Bd 3. Ergänzungsband, Berlin, 1935, 1 Teil, S. 200.
15. Melford D. A., Hoar T. P. J. Inst. Metals, 1957, v. 85, p. 197.
16. Еременко В. Н., Ниженко В. И. «Укр. хим. ж.», 1960, т. 26, с. 423.
17. Kingeri W. D., Humenik M. J. Phys. Chem., 1953, v. 57, p. 359.
18. Живов В. Г. «Труды Всесоюз. алюминиево-магниевого ин-та», 1947, т. 14, с. 99.
19. Найдич Ю. В., Еременко В. Н. «Физика металлов и металловедение», 1961, т. 11, с. 5.
20. Kozakevitch P., Urrain G. Compt. rend. Acad. Sci., 1961, v. 20, p. 253.
21. Еременко В. Н., Иващенко Ю. Н., Ниженко В. И. Экспериментальная техника и методы высокотемпературных исследований. М., Изд-во АН СССР, 1959, с. 295.
22. Еременко В. Н., Найдич Ю. В. «Изв. АН СССР. ОТН. Металлургия и топливо», 1959, т. 6, с. 139.
23. Пугачевич П. П., Константинов В. А. «Докл. АН СССР», 1947, т. 57, с. 797.
24. Василиу М. И., Еременко В. Н., Фесенко В. Н. Строение вещества и спектроскопия. Л., Изд-во АН СССР, 1960, с. 78.
25. Астахов К. В., Панин Н., Добкина З. «Ж. физ. химии», 1946, т. 20, с. 4.
26. Greenway H. T. J. Inst. Metals, 1947, v. 74, p. 133.
27. Филянд М. А., Семенова Е. И. Свойства редких элементов. М., Металлургиздат, 1953.
28. Еременко В. Н., Найдич Ю. В. «Изв. АН СССР. ОТН. Металлургия и топливо», 1959, т. 2, с. 111.
29. Тримофеичева О. А., Лазарев В. Б. «Изв. АН СССР. Отд. хим. наук», 1962, т. 2, с. 358.
30. Ефремов Ю. В., Голубев И. Ф. «Ж. физ. химии», 1962, т. 6, с. 36.

III. КИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

ГЛАВА 15

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Коэффициент теплопроводности λ может быть определен из уравнения:

$$Q_x = -\lambda \frac{dt}{dx},$$

где Q_x — плотность теплового потока в направлении x ; t — температура тела, °C. В системе СИ плотность теплового потока определяется как количество тепла, проходящего в 1 сек через 1 м² поверхности, расположенной нормально к направлению x . Размерность λ — $вт/(м \cdot град)$.

Таблица 15.1

Коэффициенты перевода единиц измерения коэффициента теплопроводности [1—3]

Единица измерения	$\frac{вт}{м \cdot град}$	$\frac{вт}{см \cdot град}$	$\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$	$\frac{ккал}{м \cdot ч \cdot град}$	$\frac{Btu}{ft \cdot h \cdot ^\circ F}$	$\frac{CHU}{ft \cdot h \cdot ^\circ F}$
$\frac{вт}{м \cdot град}$	1	0,01	0,0023885	0,85984	0,57780	0,32100
$\frac{вт}{см \cdot град}$	100,0	1	0,23885	85,984	57,780	32,100
$\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$	418,68	4,1868	1	360,0	241,91	134,39
$\frac{ккал}{м \cdot ч \cdot град}$	1,1630	0,011630	0,0027778	1	0,67198	0,37332
$\frac{Btu}{ft \cdot h \cdot ^\circ F}$	1,7307	0,017307	0,0041338	1,4881	1	0,55556
$\frac{CHU}{ft \cdot h \cdot ^\circ F}$	3,1152	0,031152	0,0074410	2,6787	1,800	1

15.1. ЭЛЕМЕНТЫ

Теплопроводность тел независимо от их химического состава существенно зависит от их физического состояния. Коэффициент теплопроводности может меняться в широких пределах в зависимости от того, находится ли тело в аморфном (стекловидном) состоянии или представляет собой монокристалл. Поликристаллические тела обладают промежуточной теплопроводностью между теплопроводностями монокристалла и аморфного тела. Их теплопроводность тем ближе к теплопроводности аморфного тела, чем меньше размеры кристаллов.

Сильное влияние на теплопроводность тел могут оказывать кристаллическая система, примеси, влажность, пористость и т. д.

На практике часто случается, что теплопроводность внутри тела и вблизи его границ различна. Это различие может быть вызвано как изменением условий протекания процессов теплопередачи, так и изменением структуры вещества (в результате термообработки, наклепа и т. д.) [3].

В таблицах приведены коэффициенты теплопроводности для части тела, удаленной на достаточное расстояние от границ.

В табл. 15.2 приведены коэффициенты теплопроводности элементов. В первой колонке таблицы даны атомные номера элементов Z , во второй — химические символы элементов или их соединений (например, N_2 , O_2 и т. д.), для которых приведены значения коэффициентов теплопроводности. Для каждого значения коэффициента теплопроводности внизу в скобках указана температура, °C, при которой измерена теплопроводность.

Коэффициенты теплопроводности паров и газов даны при давлении 1 атм. В тех случаях, когда значения коэффициента теплопроводности приведены для температуры фазового перехода, агрегатное состояние вещества указано буквой, стоящей рядом со значением температуры, например (182 ж.). При этом к. означает кристаллическое состояние; ж. — жидкость; г — газ; т. — твердое вещество; ам. — вещество в аморфном состоянии, мк. — монокристалл. Если коэффициент теплопроводности проявляет сильную зависимость от агрегатного состояния вещества при данной температуре, то буква указывает на состояние, для которого приведено значение λ .

Погрешности приводимых значений колеблются от ± 10 до $\pm 20\%$.

Коэффициенты теплопроводности элементов

Z	Химический символ	Коэффициент теплопроводности λ , $\frac{\text{вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$ (при температуре t , °C)								Литерату- ра
1	H ₂	0,108 (—257)	0,141 (—243)	0,053 (—193)	0,131 (—73)	0,168 (0)	0,368 (500)	0,568 (1027)	0,878 (1727)	[1]
2	He	0,018 (—270,8)	0,027 (—268,9)	0,058 (—203)	0,115 (—73)	0,143 (0)	0,278 (427)	0,479 (1227)	0,941 (4000)	[1, 3]
3	Li	418 (—250)	71 (—50)	71 (182 т.)	42,8 (182 ж.)	52,9 (627)	62,1 (1027)	160 (1427)	110 (1727)	[1, 4—6]
4	Be	206 (—173)	194 (—73)	182 (27)	156 (227)	120 (527)	83* (800)	76 (1227)	62,8* (1500)	[1, 6, 7]
5	B	1,5 (27—87)								
6	C ^{2*}	114 (20)	86 (200)	61 (600)	47 (900)	40 (1200)	34 (1500)	25 (1800)		[6]
7	N ₂	0,0078 (—193)	0,0243 (0)	0,0449 (300)	0,0583 (600)	0,0772 (900)	0,087 (1127)	0,142 (2000)	0,949 (5000)	[1, 6]
8	O ₂	0,161 (—193)	0,0092 (—173)	0,025 (7)	0,0649 (627)	0,0923 (1127)	0,131 (1727)	2,924 (3527)	0,396 (5727)	[1, 6, 8]
9	F ₂	0,0086 (—173)	0,0182 (—73)	0,0248 (0)	0,0269 (27)	0,0344 (127)	0,0415 (227)	0,0628 (527)	0,0774 (727)	[9]
10	Ne	0,117 (—248)	0,092 (—243)	0,0205 (—183)	0,0464 (0)	0,0598 (127)	0,0839 (377)	0,101 (577)	0,133 (1027)	[1, 3, 6]
11	Na	168 (—240)	142 (—150)	143 (—53)	133 (27)	123 (97)	84 (98)	72 (377)	43 (927)	[1, 6, 8]
12	Mg	800* (—267)	1380* (—254)	180* (—203)	165 (0)	112 (500)	130 (649)	100 (651)	98 (900)	[3, 6]
13	Al	1340* (—270)	4520* (—258)	1675* (—233)	197 (—173)	207 (27)	233 (327)	282 (627)	62 (927)	[3, 6]

** Указан коэффициент теплопроводности $\lambda_{\perp}$ реакторного графита с плотностью 1,65—1,72 г/см³ поперек направления прессования. Коэффициент теплопроводности вдоль направления прессования $\lambda_{\parallel}$ обычно в 1,5 раза выше, чем $\lambda_{\perp}$.

Z	Химический символ	Коэффициент теплопроводности λ , $\frac{вт}{м \cdot град}$ (при температуре t , °C)								Литерату- ра
14	Si	167 (0)	25,9 (1414)							[3]
16	S	0,64 (—190)	0,208 (0)							[10]
17	Cl ₂	0,0054 (—73)	0,0079 (0)	0,0088 (27)	0,0106 (77)	0,0124 (127)	0,0158 (227)	0,0188 (327)	0,0215 (427)	[1,3]
18	Ar	0,006 (—183)	0,0126 (—73)	0,0167 (7)	0,0222 (127)	0,0436 (727)	0,0667 (1727)	0,102 (3227)	0,131 (4727)	[1,6]
19	K	110 (—53)	100 (7)	90 (63,4)	49 (63,9)	38 (527)	29 (827)	21,1 927	24,3 1227	[1,3,6]
20	Ca	98 (0)								[5]
22	Ti	15,1 (—173)	15,5 (20)	16,9 (300)	19,4 (700)	10,5* (1000)	8,8* (1660)			[3,6]
23	V	32,1 (—173)	33,2 (20)	34,4 (200)	35,7 (400)	37,2 (600)	39,5 (900)	42,3 (1200)	45,6 1500	[6]
24	Cr	72 (—73)	67 (27)	58 (127)	50 (227)	45 (327)	35 (527)	31 (727)	29 (1127)	[3,6]
26	Fe	561 (—252)	151 (—190)	75 (0)	68 (127)	50 (427)	41 (727)	39 (1127)	35,6 (1530)	[3,6,8]
27	Co	37,5 (—173)	70,9 (17)	94,0 (97)	117 (297)	126,8 (497)	107 (797)	66 (1097)	11 (1397)	[6]
28	Ni	127 (—173)	92 (20)	83 (100)	68 (300)	62 (500)	58 (700)	56 (900)	55 (1300)	[3,6]
29	Cu	1000* (—270)	5200* (—254,3)	1500* (—229,1)	600* (—210,2)	395÷402 (20)	373 (300)	321 (900)	301 (1083 т.)	[3,6]

Z	Химический символ	Коэффициент теплопроводности λ , $\frac{вт}{м \cdot ^\circ C}$ (при температуре t , $^\circ C$)								Литерату- ра
30	Zn	1300* (-268,5)	1500* (-261,5)	440* (-249,8)	160* (-226,4)	111 (20)	110 (100)	59 (419)	57 (619)	[3,4]
31	Ga	41 (0)	33 (27)	26 (31)	27 (100)					[6]
32	Ge	105 (-100)	60,3 (0)	13,4 (957)						[3,5]
33	As	36,8 (20)								[9]
34	Se	0,13 (25)								[9]
36	Kr	0,0042 (-148)	0,0072 (-48)	0,0097 (27)	0,0149 227	0,0196 427	0,0238 627	0,0275 827	0,0307 1027	[1,3]
37	Rb	35,5 (20)	29,3 (39 ж.)	29,8 (227)	25,9 (427)	22,2 (627)	0,0118 (727)	0,0125 (1027)	0,0141 (1227)	[1,6]
40	Zr	22,3 (-173)	21,4 (20)	20,9 (200)	20,4 (400)	19,9 (700)	19,7 (1000)	19,6 (1300)	19,6 (1600)	[6]
41	Nb	49 (-173)	50 (-73)	53 (27)	59 (327)	67 (727)	76 (1227)	91 (1827)	102 (2427)	[6]
42	Mo	205 (-173)	169 (-73)	162 (27)	158 (327)	158 (727)	114 (1227)	100 (2127)	73,3 (2620 г.)	[3,6]
44	Ru	108 (20)								[3]
45	Rh	2380 (-252)	211 (-190)	125 (18)	120 (100)					[3,7,8]
46	Pd	76,2 (20)								[3]

Z	Химический символ	Коэффициент теплопроводности λ , $\frac{\text{вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$ (при температуре t , °C)								Литерату- ра
47	Ag	7000* (—269)	10 800* (—265)	3810* (—252)	800* (—230)	422 (—100)	418 (27)	362 (300)	5,82 (960 т.)	[3,5,6]
48	Cd	950* (—272)	1200* (—271)	550* (—266)	96 (—100)	93 (20)	91,9 (100)	45,2 (321 ж.)	44 (700)	[3,5,6]
49	In	500* (—272)	800* (—269)	190* (—263)	90* (—243)	88 (20)	71,5 (40)	71,0 (140)		[3,6]
50	Sn	80,4 (—160)	74 (—100)	65 (20)	60 (100)	34,3 (232 ж.)	33,8 (300)	33,1 (400)	32,5 (500)	[3—6]
51	Sb	23 (—100)	23 (20)	17 (100)	17 (300)	21,8 (630 ж.)	21 (700)	20,9 (730)		[3, 5]
52	Te	3,64 (0 м.к.)	58,15 (20)	1,38 (452 к.)						[3,6]
53	I	0,419 (24,4)	0,444 (30)	0,486 (42,86)						[9,10]
54	Xe	0,0033 (—98)	0,0052 (0)	0,0067 (77)	0,0090 (227)	0,0121 (427)	0,0149 (627)	0,0176 (827)	0,0200 (1027)	[1]
55	Cs	~23,8 (20)	19,0 (28,5 ж.)	19,3 (127)	19,2 (427)	17,7 (627)	8,28 (727)	9,09 (1027)	10,1 (1227)	[1,6]
72	Hf	20,9 (20)	22,6* (100)	21 (300)	18,6* (1000)	17,6 (2130 т.)	16,7* (2300)			[3,5]
73	Ta	63 (—173)	63 (—73)	63 (27)	68 (527)	74 (927)	86 (1527)	100 (2427)	110 (3000)	[3,6]
74	W	3435 (—252)	232,5 (—190)	130 (27)	126 (327)	115 (927)	101 (1827)	92 (2427)	88 (3650 т.)	[3,68]
75	Re	50,2 (20)								[3]
76	Os	88 (20)								[3]

Z	Химический символ	Коэффициент теплопроводности λ , $\frac{\text{вт}}{\text{м}\cdot\text{град}}$ (при температуре t , °C)								Литерату- ра
77	Ir	151 (-100)	148 (0)	138 (20)	143 (100)					[3,5,7, 10]
78	Pt	~333 (-252)	77,8 (-190)	74,1 (20)	75,3* (300)	83,7* (1000)	~90 (1755 т.)	100* (3000)		[3,8]
79	Au	1500* (-270)	2900* (-263)	1000* (-249)	500 (-239)	330 (-100)	310 (0)	310 (100)		[3,5]
80	Hg	48 (-173)	29,6 (-73)	7,639 (-38,87 ж.)	8,447 (20)	9,475 (100)	11,69 (300)	14,04 (600)	14,98 (800)	[1,6]
81	Tl	1150* (-272)	1370* (-270)	500* (-263)	150* (-243)	63 (-173)	47 (27)	40 (127)	36 (227)	[3,6]
82	Pb	53,6 (-250)	47,3 (-200)	40,6 (-100)	34,89 (20)	28,14 (300)	15,9 (327,3 ж.)	15,58 (600)	19,77 (800)	[3,5,6,8]
83	Bi	12 (-200)	8 (20)	7-8,8 (270)	11,3 (271 ж.)	14 (300)	15 (400)	17 (600)	19 (800)	[3,6]
90	Th	40,4 (-173)	35,6 (27)	33,3 (127)	28,6 (327)	21,7 (627)	12,0 (1027)	7,5 (1227)	2,8 (1427)	[3,6]
92	U	17,8 (-73)	22,5 (27)	26,5 (127)	31,8 (327)	32,4 (627)	22,4 (927)	13,7 (1137)	13,8 (1227)	[6]
94	Pu	4,1 (-173)	4,65 (-73)	5,23 (27)	5,80 (127)	6,40 (227)	6,98 (327)	8,20 (5,27)	9,30 727	[6]

* Получено путем пересчета с графиков, приведенных в оригинале.

15.2. ГАЗЫ И ПАРЫ

Коэффициент теплопроводности газа связан с его молекулярными характеристиками выражением $\lambda \approx \nu l n m c_V$, где ν — скорость молекул; l — длина свободного пробега молекулы; n — число молекул в единице объема; m — масса молекулы; c_V — теплоемкость единицы массы при постоянном объеме. Связь λ с коэффициентом вязкости газа μ выражается формулой $\lambda = S \mu c_V$. Число Стантона S меняется от 2,5 для одноатомного газа до ~1 при увеличении числа атомов в

молекуле до бесконечности. Коэффициент теплопроводности газов слабо зависит от давления, поскольку увеличение числа молекул в единице объема n приводит к пропорциональному уменьшению длины свободного пробега l . Небольшое уменьшение коэффициента теплопроводности с уменьшением давления (в среднем ~1% на 1 атм) вызвано изменением удельной теплоемкости [3]. Если длина свободного пробега сравнима с размерами слоя (сосуда) или больше, то предыдущее условие не выполняется, и коэффициент теплопроводности пропорционален числу молекул n , т. е. давлению газа, и стремится к нулю с уменьшением давления.

Таблица 15.3

Коэффициенты теплопроводности газов, содержащих углерод [3] (при давлении 1 атм.)

Газ	Химическая формула	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, 10^{-6} \frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}}$
Ацетальдегид	CH_3COH	100	42,0
Ацетилен	C_2H_2	0	44
Ацетон	CH_3COCH_3	100	40,5
Ацетонитрил	CH_3CN	100	33,0
Бензол	C_6H_6	100	40,1
Изобутан	C_4H_{10}	0	30,4
n-Бутан	C_4H_{10}	0	29,4
Гексан	C_6H_{14}	100	48,0
Диоксан	$(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_2$	100	40,0
Диэтиламин	$(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{NH}$	100	52,0
Метан	CH_4	0	69,6
Метилацетат	$\text{CH}_3\text{COOCH}_3$	100	42,1
Метил бромистый	CH_3Br	100	28,0
» хлористый	CH_3Cl	0	27,5
Метилен хлористый	CH_2Cl_2	100	25,2
Нитрометан	CH_3NO_2	100	30,0
Изопентан	C_5H_{12}	0	29,0
n-Пентан	C_5H_{12}	0	29,3
Пропан	C_3H_8	0	35,5
Спирт метиловый	CH_3OH	100	53,0
» изопропиловый	$\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$	100	52,5
» n-пропиловый	$\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$	100	49,3
» этиловый	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	100	54,0
Триэтиламин	$\text{C}_6\text{H}_{15}\text{N}$	100	60,0
Углерод четыреххлористый	CCl_4	100	20,5
Углерода двуокись	CO_2	0	34,6
Углерода окись	CO	0	51,1
Фреон-11	CCl_3F	100	30,0
Фреон-12	CCl_2F_2	0	20,5
Фреон-21	CHCl_2F	0	21,5
Фреон-22	CHClF_2	0	24,5
Фреон-113	$\text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}_3$	100	23,0
Хлороформ	CHCl_3	100	23,4
Циклогексан	C_6H_{12}	100	40,0
Циклопропан	C_3H_6	0	27,0
Этан	C_2H_6	0	43,5
Этил хлористый	$\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$	100	40
Этилацетат	$\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$	100	38,6
Этилен	C_2H_4	0	41,5
Этилен хлористый	$\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$	100	32,2
Этилена окись	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	100	46
Этилнитрат	$\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_3$	100	38,0
Этилформиат	HCOOC_2H_5	100	44,0
Эфир диэтиловый	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OC}_2\text{H}_5$	100	53,0

15.3. ЖИДКОСТИ

Коэффициент теплопроводности жидкостей при температуре 0°C и атмосферном давлении с погрешностью $\pm 10\%$ может быть рассчитан по полуэмпирической формуле [3]

$$\lambda \approx 10^{-6} \frac{90C_p}{N^{0,25}} \sqrt{\rho T_{\text{кип}}},$$

Таблица 15.4

Коэффициент теплопроводности газов, не содержащих углерода (при давлении 1 атм.)

Газ или пар	Химическая формула	Температура кипения, $^\circ\text{C}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, 10^{-6} \frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}}$	Литература
Азот	N_2	-196	0	57,4	[3]
Азота двуокись	NO_2	—	55	95,7	[10]
» закись	N_2O	-88	0	33,6	[3]
» окись	NO	-152	0	56,4	[3]
Аммиак	NH_3	-33	0	52,2	[3]
Аргон	Ar	-185	0	39,0	[3]
Вода	H_2O	100	100	56,1—58,9	[1, 3, 6]
			300	103,9	[1, 6]
			500	164	[1, 6]
			700	234	[1, 6]
Вода тяжелая	D_2O	101,4	100	57	[1]
			300	106	[1]
			500	173	[1]
Водород	H_2	-253	0	401	[3]
Воздух			-191,1	18,2	[10]
			0	57,5	[3, 1]
			200	88	[3]
Гелий	He	-269	0	342	[3]
Кислород	O_2	-183	0	57,5	[3]
Криптон	Kr	-153	0	20,9	[3]
Ксенон	Xe	-107	0	12,3	[3]
Неон	Ne	-246	0	109,5	[3]
Сероводород	H_2S	-62	0	30,4	[3]
Серы двуокись	SO_2	-10	0	19,8	[3]
Уран шестифтористый	UF_6	56	100	21,4	[3]
Хлор	Cl_2	-35	0	17,8	[3]

где λ — коэффициент теплопроводности, $\text{кал}/(\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град})$; $T_{\text{кип}}$ — температура кипения, $^\circ\text{K}$; ρ — плотность жидкости, $\text{г}/\text{см}^3$; C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении, $\text{кал}/(\text{г} \cdot \text{град})$; N — число атомов в молекуле жидкости. С понижением температуры коэффициенты теплопроводности жидкостей увеличиваются. В интервале температур $-50 < t < +50^\circ\text{C}$ зависимость $\lambda(t)$ может быть приближенно представлена выражением:

$$\lambda(t) \approx \lambda(0) [1 + 0,01 t (\sqrt{T_{\text{кип}}}/23,5 - 1)].$$

Вода и глицерин представляют исключение.

У всех жидкостей коэффициент теплопроводности возрастает с ростом давления. Это увеличение практически несущественно до давлений 50 атм. При высоких давлениях P , достигающих 12 000 атм, коэффициент теплопроводности при температуре 0°C можно рассчитывать по формуле:

$$\lambda(P) \approx \lambda(0) [1 + (\rho T_{\text{кип}})^{-1/2} (P/144)^{2/3}],$$

где P — избыточное давление, атм.

В табл. 15.5 приведены коэффициенты теплопроводности жидкостей при температуре 0°C (если не указано другое значение температуры).

Коэффициенты теплопроводности жидкостей

Жидкость	Формула	$\lambda_{\text{жид}}^{\text{жид}}$ °C	$10^{-4} \frac{\lambda}{\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}}$	Литература
Аллил бромистый	$\text{C}_3\text{H}_5\text{Br}$	71	278	[3]
Аммиак	NH_3	—33	1200	[2]
Анилин	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$	184	432	[3, 4]
Ацетальдегид	CH_3COH	21	415	[3]
Ацетон	CH_3COCH_3	56	406	[3]
Бензол	C_6H_6	80	365	[3, 4]
Бромбензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Br}$	56	280	[3]
Бромформ	CHBr_3	149	254	[3]
o-Бромфенол	$\text{C}_6\text{H}_4\text{ONHBr}$	195	318	[3]
Бутилацетат	$\text{CH}_3\text{COOC}_4\text{H}_9$	125	402	[3]
Вода при $t=0^\circ\text{C}$	H_2O	100	1350	[3]
100°C			1631	[1, 6]
200°C			1569	[1]
350°C			978	[1]
Вода тяжелая при $t=0^\circ\text{C}$	D_2O	101.4	1335	[3]
100°C			1522	[1, 6]
200°C			1419	[1, 6]
350°C			833	[1, 6]
Гексан	C_6H_{12}	69	355	[3]
Глицерин	$(\text{CH}_2\text{OH})_2\text{CHOH}$	290	680	[3]
Дихлорметан	CH_2Cl_2	41	372	[3]
Дихлорпропан	$\text{C}_3\text{H}_7\text{Cl}_2$	97	310	[3]
Дихлорэтан	$\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$	83	350	[3]
Кислота муравьиная	CHOOH	101	648	[3]
» пропионовая	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$	141	420	[3]
» серная	H_2SO_4	330	715	[3]
» стеариновая	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$	387	400	[3]
» уксусная	CH_3COOH	118	450	[3]
Метилацетат	$\text{CH}_3\text{COOCH}_3$	57	390	[3]
Метил иодистый	CH_3I	42	237	[3]
Метилформиат	HCOOCH_3	33	480	[3]
Нитробензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	211	397	[3]
Нитрометан	CH_3NO_2	101	508	[3]
o-Нитротолуол	$\text{C}_6\text{H}_4\text{CH}_3\text{NO}_2$	222	366	[3]
Пентахлорэтан	C_2HCl_5	162	305	[3]
Пиридин	$\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$	115	440	[3]
Пропанол	$\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$	97	410	[3]
Сероуглерод	CS_2	46	336	[3]
Спирт аллиловый	$\text{C}_3\text{H}_5\text{OH}$	103	455	[3]
» метиловый	CH_3OH	65	530	[3]
» этиловый	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	78	440	[3]
Тетрахлорэтан	$\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_4$	146	285	[3]
Тетрахлорэтилен	C_2Cl_4	121	308	[3]
Трихлорэтилен	C_2HCl_3	87	290	[3]
Толуол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$	111	330	[3]
Углерод четыреххлористый	CCl_4	77	268	[3]
Фреон-11	CCl_3F	22	250	[3]
Фреон-12	CCl_2F_2	—30	225	[3]
Фреон-21	CHCl_2F	9	290	[3]
Фреон-22	CHClF_2	—41	265	[3]
Фреон-113	$\text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}_3$	46	225	[3]
Фреон-114	$\text{C}_2\text{Cl}_2\text{F}_4$	4	215	[3]
Фторбензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{F}$	85	312	[3]
Хлорбензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	133	317	[3]
Хлороформ	CHCl_3	61	300	[3]
o-Хлорфенол	$\text{C}_6\text{H}_4\text{ONCl}$	76	364	[3]
Этил бромистый	$\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$	38	269	[3]
» иодистый	$\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$	72	230	[3]
Этиленгликоль	$\text{CH}_2\text{OHCH}_2\text{OH}$	198	635	[3]
Этилформиат	HCOOC_2H_5	54	407	[3]

15.4. СПЛАВЫ

В табл. 15.6 — 15.15 приведены коэффициенты теплопроводности сплавов при различных температурах. Для некоторых сплавов и сталей в первой колонке таблиц дано название или сокращенное наименование согласно ГОСТу. В скобках приведены устаревшие названия. Число перед химическим символом элемента, входящего в сплав, означает его массовое содержание в сплаве.

Таблица 15.6

Коэффициенты теплопроводности сталей [6]		
Марка стали	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \frac{\text{ккал}}{\text{см}\cdot\text{сек}\cdot\text{град}}$
Ст. 20	27	0,136
	527	0,10
Ст. 35	27	0,0645
	527	0,115
Ст. 45	27	0,0955
	927	0,0715
Ст. 65Г	27	0,115
	527	0,0885
Ст. У8	27	0,055
	727	0,107
13Н2ХА, 15ХА, 15Х, 20Х	27	0,0575
	927	0,12
30ХГС, 30ХГСА	27	0,0815
	927	0,062
15ХМ	27	0,093
	927	0,072
30ХМ, 30ХМА	27	0,0925
	927	0,084
1Х11МФ, 1Х12ВНМФ	27	0,10
	927	0,075
12Х1МФ	27	0,092
	927	0,0835
15Л, 20Л÷55Л	27	0,10
	927	0,074
Х5М	27	0,10
	927	0,086
1Х13 (ЭЖ1)	27	0,109
	927	0,0785
2Х12ВМБФР (ЭИ 993)	—73	0,105
	1127	0,081
4Х13 (ЭЖ4)	—73	0,0735
	1127	0,079
1Х12В2МФ (ЭИ756)	—73	0,079
	1127	0,072
Х18Н9Т (1Х18Н9Т, ЭЯ1Т)	—73	0,078
	1127	0,0755
0Х18Н12Б(Х18Н11Б, ЭИ402)	—73	0,0727
	1127	0,0768
Х23Н18 (ЭИ417)	—73	0,0323
	1127	0,048
Х17Н13М2Т (Х18Н12М2Т, ЭИ448)	—73	0,067
	1127	0,0325
1Х16Н13М2Б (ЭИ680), 3Х19Н9МВБТ (ЭИ572)	—73	0,0484
	1127	0,0622
Х16Н25М6 (ЭИ395)	—73	0,0323
	1127	0,0434
	—73	0,033
	1127	0,0424
	—73	0,0328
	1127	0,0419
	—73	0,0304
	1127	0,0461

Продолжение табл. 15.6

Марка стали	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \frac{\text{ккал}}{\text{см}\cdot\text{сек}\cdot\text{град}}$
ХН35ВТ (ЭИ612), ХН35ВТР (ЭИ725), ХН35ВМТ (ЭИ692)	—73	0,0316
	1127	0,0455
Х22Н26, ВЖ100	—73	0,0258
	727	0,056
ХН78Т (ЭИ435, Нимоник-80, США)	27	0,030
	627	0,0545
ХН77ТЮР (ЭИ437Б), ХН77ТЮ (ЭИ437А)	—73	0,0263
	727	0,0575
ХН80ТБЮ (ЭИ607, Инконель Х, США)	—73	0,0263
	1127	0,0645
ХН70ВМЮТ (ЭИ765), ХН70ВМТЮ (ЭИ617)	—73	0,0167
	1127	0,0575
ХН60Ю (ЭИ559)	—73	0,0191
	1127	0,070
ХН60В (ЭИ868)	—73	0,0215
	727	0,054
Армо-железо (0,023% С; 0,007% Si; 0,025% Mn; 0,007% P; 0,02% S; остальное Fe)	0	0,186
	27	0,07—0,14
Чугун	27	0,07—0,14

Таблица 15.7

Коэффициенты теплопроводности сплавов меди [3,6]

Сплав (состав, вес. %)	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \frac{\text{вт}}{\text{м}\cdot\text{град}}$
Бронза:		
ОФ 10-1	27	34
	627	52
ОЦ 10-2	27	55
	627	77
ОС 10-10	27	45
	527	67
А-5	27	105
	627	153
АЖМЦ 10-3-1-5	27	59
	527	84
КМЦ 3-1	27	42
	427	54
МЦС 8-20	27	32
	627	53
Константан МНМц 40-1,5 (40% Ni + примесь Со; 1,5% Mn; 58,5% Cu)	0	20,9
	400	37,2
Копель МНМц 43-0,5 (56,5% Cu; 0,5% Mn; 43% Ni + примесь Со)	0	24,2
Латунь ЛАН 59-3-2, алюминиево-никелевая	27	84
	627	152
Латунь ЛМц 58-2, марганцовистая	27	70
	627	122
Латунь ЛС 59-1В, свинцовистая	27	105
	627	183
Латунь ЛО 70-1, оловянистая	27	92
	327	136
Манганин МНМц 3-12 (3% Ni; 12% Mn; 85% Cu)	0	21,7
	300	36,0

Коэффициенты теплопроводности сплавов
алюминия [3, 6]

Сплав (состав, вес. %)	t, °C	λ , $\frac{\text{вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$
Нейзильбер МНЦ 15-20 (15% Ni; 20% Zn; 65% Cu)	0	125
	600	229,1
Мельхиор МНЖМц 30-0,8-1	0	37,1
Томпак ЛТ 96, волооченый	27	244
	527	260
» РТ 90, прокатный	27	114
	527	288
Cu — Al (99,29% Cu; 0,71% Al)	20	175
(95,39% Cu; 4,61% Al)	20	82,9
(90,0% Cu; 10,0% Al)	20	46,9
Cu — Si (99% Cu; 1% Si)	20	82,5
(96,09% Cu; 3,91% Si)	20	36,4
Cu — P (99,925% Cu; 0,075% P)	20	238,6
(99,520% Cu; 0,480 P)	20	90,5
Cu — Mn (85% Cu; 15% Mn)	20	21,7
(70% Cu; 30% Mn)	20	12,6
Cu — Ni (98,03% Cu; 1,97 Ni)	20	171,6
(90% Cu; 10% Ni)	27	59
(82,7% Cu; 17,3% Ni)	20	34
(54% Cu; 46% Ni)	20	20,3
Cu — Zn (70% Cu; 30% Zn)	17	109 [4]
(61,5% Cu; 38,5% Zn)	20	78,7
Cu — Sn (99,01% Cu; 0,99 Sn)	20	228
(95,08% Cu; 4,92% Sn)	20	81,6
(75% Cu; 25% Sn)	27	25,1

Сплав (состав, вес. %)	t, °C	λ , $\frac{\text{вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$
A (примесь <0,2%)	—	225
А1, А2, АД1, АД2 (примесь <1%)	20	206
AB (Al; 0,6% Cu; 0,7% Mg; 0,25% Mn)	—	209
AK4, AK4-1	27	144
	427	167
AK8 (Al; 4,4% Cu; 0,5% Mg; 0,8% Mn; 0,8% Si)	—	186
АЛ3, АЛ3В	27	163
АЛ4 (Al; 9,2% Si; 0,25% Mg; 0,38% Mn; 0,9% Fe)	27	146
Al—Li (99% Al; 1% Li)	20	125
(95% Al; 5% Li)	20	75
(90% Al; 10% Li)	20	54
AMr (Al; 2,5% Mg; 0,3% Mn; 0,1% Cu)	—	126
AMr (Al; 5% Mg; 0,35% Mn; 0,2% Cu)	—	116
AMц (Al; 0,2% Cu; 0,03% Mg; 1,3% Mn)	—	186
B95 (Al; 1,7% Cu; 2,3% Mg; 0,6% Mn; 6% Zn)	—	143
Д1 (Al; 4,3% Cu; 0,6% Mg; 0,6% Mn)	—	170
Д16 (Al; 4,4% Cu; 1,5% Mg; 0,6% Mn)	—	169
Д18 (Al; 2,6% Cu; 0,35% Mg; 0,2% Mn)	—	174
Al—Si (95% Al; 5% Si)	20	142
(88% Al; 12% Si)	20	176
(80% Al; 20% Si)	20	160
αГ (Al; 12% Si; 0,35% Mg; 0,28% Fe; 0,29% Mn)	20	186
RR-77 (Al; 2,2% Cu; 2,5% Mg; 4,96% Zn)	20	163
Y (Al; 3,76% Cu; 1,85% Ni; 1,33% Mg)	20	182

Таблица 15.8

Коэффициенты теплопроводности сплавов
никеля [3,6]

Сплав (состав, вес. %)	t, °C	λ , $\frac{\text{вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$
Алюмель НМЦАК 2-2-1	0	32,7
Инвар (35% Ni; 65% Fe)	0	11,0
	300	12,7
Монель (68% Ni; 28% Cu; 2,5% Fe; 1,5% Mn)	0	22,1
	400	33,7
	800	46,0
Нихром (90% Ni; 10% Cr)	0	17,1
	400	24,1
Нихром (80% Ni; 20% Cr)	0	12,2
	600	22,6
Ферронихром (61% Ni; 20% Fe; 15% Cr; 4% Mn)	0	11,6
	600	13,1
Хромель ХН9 (91% Ni; 9% Cr)	0	16,0
	400	23,5

Таблица 15.10

Коэффициенты теплопроводности сплавов титана [3, 6]

Сплав (состав, вес. %)	t, °C	λ , $\frac{\text{ккал}}{\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}}$
BT, BT1-1 (Ti; 0,1% C; 0,3% Fe; 0,15% Si; 0,15% O)	27	0,0397
BT3 (Ti; ~5% Al; ~2,5% Cr)	27	0,017
BT4 (Ti; ~4,2% Al; ~1,4% Mn)	27	0,0215
BT5-1 (Ti; 5% Al; 2,5% Sn)	27	0,0179
BT6 (Ti; ~5,5% Al; 4% V)	27	0,0179
BT8 (Ti; ~6,3% Al; 3,3% Mo)	27	0,017
BT14 (Ti; 4% Al; 3% Mo; 1% V)	27	0,020
BT15 (Ti; 3% Al; 8% Mo; 11% Cr)	27	0,0191
BT16 (Ti; 2,5% Al; 7,5% Mo)	27	0,0251
OT3 (Ti; ~2% Al; ~1,4% Mn)	27	0,0217
OT4 (Ti; 3% Al; 1,5% Mn)	27	0,0198
(92,5% Ti; 2,5% Sn; 5,0% Al)	50	0,0183
	400	0,0277
(89,5% Ti; 4,0% Al; 4,0% Mo; 2,0% Sn; 0,5% Si)	50	0,0185
	400	0,0275
(96% Ti; 2,0% Mn; 2,0% Al)	50	0,0237
	400	0,033

Коэффициенты теплопроводности сплавов
магния [3, 6]

Сплав (состав, вес.%)	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \frac{\text{вт}}{\text{м}\cdot\text{град}}$
MA1 (Mg; 0,3% Al; 0,1% Zn; 2,5% Mn)	—	151
MA2 (Mg; 4% Al; 0,8% Zn; 0,5% Mn)	—	104
MA3 (Mg; 6% Al; 1% Zn; 0,5% Mn)	—	96
MA5 (Mg; 8% Al; 0,5% Zn; 0,5% Mn)	—	83,7
Магнокс А12 (Mg; 1,15% Al; 0,45% Be)	0	120
МЛ2 (Mg; 0,2% Al; 0,2% Zn)	—	127
МЛ3 (Mg; 3,6% Al; 1,5% Zn; 0,5% Mn)	—	106
МЛ4 (Mg; 6% Al; 2,5% Zn; 0,5% Mn)	—	79
МЛ5 (Mg; 8,5% Al; 0,5% Zn; 0,3% Mn)	—	75
МЛ6 (Mg; 10% Al; 0,3% Mn)	—	74
AZ61 (Mg; 6,5% Al; 1,1% Ir; 0,5% Mn)	27	82,9
M15Z (Mg; 0,5% Zr; 0,1% Mn; 0,53% Zn)	27	120
M25 (Mg; 0,37% Zr; 0,24% Mn)	27	114
M15C (Mg; 0,57% Zr; 0,1% Mn; 1,36% Ce)	27	109
W1635 (Mg; 5,56% Ni)	50	142
W1662 (Mg; 3,17% Ce; 1,8% Mn)	50	117
W1648 (Mg; 2,65% Ce; 5,36% Ni)	50	130
W1702 (Mg; 2,2% Ce; 2,4% Co; 1,6% Mn)	50	132
ZW1 (Mg; 0,7% Ir; 1,5% Zr)	27	133

Таблица 15.12

Коэффициенты теплопроводности сплавов
урана [6]

Сплав (состав, вес.%)	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \frac{\text{вт}}{\text{м}\cdot\text{град}}$
99,0% U; 1,0% Al	—73	14,1
	227	13,9
	627	13,6
90% U; 10% Al	—73	10,1
	227	9,9
	627	9,8
70% U; 30% Al	—73	30,6
	227	29,3
	527	27,9
50% U; 50% Al	—73	68,2
	427	34,4
	27	186,0
10% U; 90% Al	300	28,9
99,65% U; 0,35% V	300	31,0
99,89% U; 0,11% Cr	27	14,5
95% U; 5% Zr	27	14,0
90% U; 10% Zr	27	9,0
80% U; 20% Zr	27	6,0
30% U; 70% Zr	27	25,08
95% U; 5% Mo	27	26,75
70% U; 30% Mo	27	67,45
30% U; 70% Mo	27	108,16
10% U; 90% Mo	27	24
95% U; 5% Fe	27	22
90% U; 10% Fe	27	

Сплав (состав, вес. %)	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \frac{\text{вт}}{\text{м}\cdot\text{град}}$
80% U; 20% Fe	27	18
30% U; 70% Fe	27	33
67% U; 33% Be	77	105
	427	75
	1027	45
53,1% U; 46,9% Bi	27	21
36,3% U; 63,6% Bi	27	17
70% U; 20% Pu; 10% продукты деления	50	9,63
	300	15,91
	600	23,86
	800	30,14
20% U; 80% Th	600	41
10% U; 90% Th	600	42

Таблица 15.13

Коэффициенты теплопроводности сплавов свинца [6]

Сплав (состав, вес.%)	$\lambda, \frac{\text{вт}}{\text{м}\cdot\text{град}}$
Баббит Б6	21
Б16	25
Б83	33
Б89	39
Припой ПОС-18	38
ПОС-30	39
Сплав 90,25% Pb; 8% Sb; 1,75% As	11,3

Таблица 15.14

Коэффициенты теплопроводности сплавов
циркония [3, 6]

Сплав (состав, вес.%)	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \frac{\text{вт}}{\text{м}\cdot\text{град}}$
92% Zr; 8% U	100	14,5
	450	17,0
91% Zr; 8% U; 1% H	100	19,5
	400	17,2
99,66% Zr; 0,1% C; 0,84% Sn	250	15,9
97,5% Zr; 2,3% Sn; 0,1% C; 0,1% O	250	12,5
92,2% Zr; 7,6% Mo; 0,1% C; 0,1% O	250	14,6
90% Zr; 9,8% Nb; 0,2% C	250	14,6

Таблица 15.15

Коэффициенты теплопроводности сплавов Na, K, Bi и других металлов

Сплав (состав, вес.%)	t, °C	λ , кал см·сек·град	Источ- ник
56% Na; 44% K; $t_{пл} = 19^\circ\text{C}$, $t_{кип} = 825^\circ\text{C}$	19	0,059	[6]
	427	0,066	[6]
	927	0,0744	[6]
22% Na; 78% K; $t_{пл} = -11,5^\circ\text{C}$, $t_{кип} = 784^\circ\text{C}$	-11,7	0,0495	[6]
	427	0,063	[6]
	927	0,0574	[6]
55,5% Bi; 44,5% Pb; $t_{пл} = 123,4^\circ\text{C}$	150	0,0268	[6]
	700	0,0400	[6]
	0	0,0406	[6]
50% Bi; 31% Pb; 19% Sn 48% Bi; 26% Pb; 13% Sn; 13% Cd	0	0,0311	[6]
	27	0,0458	[6]
	27	0,0511	[6]
67% Be; 33% Al	27	0,046	[6]
64% Be; 36% Al	27	0,046	[6]
57% Be; 43% Al	17	0,074	[4]
90% Pt; 10% Ir	17	0,072	[4]
90% Pt; 10% Rh	—	0,0319	[4]
Сплав Вуда	18	0,191	[8]
92% Au; 8% Pt	18	0,050	[8]
55% Au; 45% Pt	18	0,110	[8]
4% Au; 96% Pt	18		[8]

15.5. ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОМПОЗИЦИИ
ЯДЕРНОГО ГОРЮЧЕГО

Таблица 15.16

Коэффициент теплопроводности огнеупорных
материалов

Материал (состав, вес.%)	ρ , $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	t, °C	λ , вт м·град	Лите- ратура
Графит реакторный (вдоль направления прессования)	1,7	-173	210	[6]
		423	100	[6]
		1423	46,9	[6]
Графит реакторный (перпен- дикулярно к направлению прессования)	1,7	-173	160	[6]
		423	75,7	[6]
		1423	40,2	[6]
Карборунд (19,52% Al_2O_3 ; 25,64% SiO_2 ; 49,39% SiC; 5,01% MgO; 0,44% Fe_2O_3)	2,19	300	4,81	[3]
		1100	3,89	[3]
Корунд (81,54% Al_2O_3 ; 15,35% SiO; 1,27% MgO; 1,84% Fe_2O_3)	2,72	300	2,36	[3]
		1100	2,08	[3]
Мушкет (3 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)	~2,5	100	5,73	[7]
		1200	3,64	[7]
Периклаз	—	0	41,8	[3]
		1100	5,86	[3]
Силлиманит (62,96% Al_2O_3 ; 34,87% SiO_2 ; 0,91% MgO; 1,26% Fe_2O_3)	2,12	300	1,31	[3]
		1100	1,50	[3]
Шамот (68,80% SiO_2 ; 31,06% Al_2O_3 ; 1,19% Fe_2O_3 ; 1,95% MgO)	1,84	300	0,88	[3]
		1100	1,09	[3]
Шпинель ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)	3,27	100	13,8	[7]
		1200	5,02	[7]
Форстерит (2 $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$)	2,22	100	3,68	[7]
		1200	1,63	[7]
Циркон ($\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$)	3,69	200	4,6	[7]
		1400	3,1	[7]

Таблица 15.17

Коэффициенты теплопроводности окислов [6, 7]

Окисел	ρ , $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	t, °C	λ , кал см·сек·град
Al_2O_3 (глинозем)	3,7—3,8	100	0,069
		1600	0,0138
BeO	2,7—2,86	100	0,500
		1600	0,0346
CaO (известь)	3,0—3,1	100	0,0333
		1000	0,0170
SiO_2 (кремнезем)	2,3—2,6	127	0,0167
		827	0,012
MgO (жженая магнезия)	3,3—3,5	100	0,0823
		1600	0,0157
NiO	5,0—5,1	600	0,010
		600	0,0083
TiO_2	4,0—5,1	600	0,011
		3,72	0,004
ZnO	5,2—5,35	100	0,005
		1400	

Таблица 15.18

Коэффициенты теплопроводности карбидов [6, 7]

Карбид	ρ , $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	t, °C	λ , $\frac{\text{кал}}{\text{см·сек·град}}$
SiC	3,23 3,08 — —	-73	0,086
		527	0,0455
		1527	0,0287
		2227	0,0335
Be_2C	2,3—2,4	27	0,0765
		627	0,043
ZrC	6,6	27	0,0478
		4,92	0,079
TiC	4,75	427	0,0263
		127	0,0335
NbC	7,82	~1600	0,105
		127	0,0455
Nb_2C	7,85	~20	0,0525
		14,5	0,086
Ta_2C	15,5	~20	0,0167
		9,18	0,0598
Mo_2C	5,48	~20	0,0717
		5,75	0,0694
VC	5,75	~20	0,086
		15,65	0,0155
W_2C	17,30	~20	0,031
		12,67	0,07—0,2
HfC	12,67	127	
		6,68	
Cr_3C_2	—	~20	
		~200	
B_4C	—	—	—

Таблица 15.19

Коэффициенты теплопроводности силицидов
при $t = 27^\circ\text{C}$ [6]

Соединение	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$\lambda, \frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}}$	Соединение	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$\lambda, \frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}}$
TiSi ₂	4,35	0,031	CrSi ₂	4,4	0,0143
ZrSi ₂	4,88	0,043	MoSi ₂	6,3	0,0694
NbSi ₂	5,45	0,062	WSi ₂	9,33	0,0454
TaSi ₂	8,83	0,0287			

Таблица 15.22

Коэффициенты теплопроводности
кремнийорганических соединений [1]

Соединение	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \frac{\text{кал}}{10^{-4} \text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}}$
Тетра-о-крезиллоксисилан (CH ₃ C ₆ H ₄ O) ₄ Si	1,128	20	2,94
	0,987	200	2,53
	0,858	350	2,19
Диэтилполисилоксан (силн-кон)	0,956	20	3,16
	0,863	150	2,5
	0,744	300	1,75

Таблица 15.23

Коэффициенты теплопроводности высокотемпературных
композиций ядерного горючего [6]

Соединение (состав, вес.%)	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}}$
UO ₂ (спеченная двуокись урана)	10,97	0 400 700 1500	0,0278 0,0177 0,0108 0,006
50% PuO ₂ ; 50% UO ₂ (спеченная смесь) PuO ₂	11,10 11,46	27 —73	0,0103 0,0172
		427	0,0101
ThO ₂ (спеченная двуокись тория)	9,96	1227 —73	0,00527 0,0276
		327	0,0136
UC	10,2	1327	0,0055
		100	0,06
		400	0,053
		827	0,0634
UC ₂	10,8	200	0,0306
		1600	0,0481
47% UO ₂ ; 53% BeO (спеченная смесь)	3,2—3,6	27	0,0696
60% UO ₂ ; 40% Al (спеченная смесь)	4,9	27	0,0167
19,9% UO ₂ ; 80,1% C (спеченная смесь)	1,93	27	0,042
30,3% UC; 69,7% C (спеченная смесь)	2,22	27	0,136
50 об.% UO ₂ ; 50 об.% W	—	100 1000	0,125 0,101
60 об.% UO ₂ ; 40 об.% Mo	—	100 1000	0,0766 0,064
20% UO ₂ ; 80% полиэтилен	—	20	$7,1 \cdot 10^{-4}$
20% UO ₂ ; 20% сажа — 60% полиэтилен	—	20	$8,7 \cdot 10^{-4}$
U ₃ O ₈	7,90	27	0,0163
UN	14,32	27	0,0406
U ₃ Si	15,6	27	0,0471
USi	10,4	27	0,0383
USi ₃	8,15	27	0,043
USi ₂	9,25	27	0,0406
U ₃ Si ₂	12,2	27	0,0335
UAl ₃	6,8	27	0,0621
UBe ₁₃	4,37	27	0,0251
US	10,87	27	0,0264
PuBe ₁₃	4,36	27	0,215
ThB ₆	—	20	0,10

Таблица 15.20

Коэффициенты теплопроводности боридов [6, 7]

Соединение	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}}$
TiB ₂	4,5	23	0,058
ZrB ₂	6,1	23	0,058
NbB ₂	6,0	23	0,040
TaB ₂	11,7	23	0,026
CrB ₂	5,6	—	0,0526
Mo ₂ B ₅	8,0	—	0,0645
W ₂ B ₅	11,0	—	0,0765
CaB ₆	—	20	0,055
SrB ₆	—	20	0,062
BaB ₆	—	20	0,086

Таблица 15.21

Коэффициенты теплопроводности нитридов [6]
при $t = 20^\circ\text{C}$

Нитрид	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$\lambda, \frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}}$	Нитрид	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$\lambda, \frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}}$
TiN	5,21	0,0695	CrN	5,9	0,0765
ZrN	7,35	0,0335	Cr ₂ N	6,5	0,143
VN	6,04	0,074	MoN	8,6	0,0382
NbN	8,4	0,0239	Mo ₃ N	9,9	0,12
TaN	13,8	0,055			

**15.6. СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ
МАТЕРИАЛЫ, ДРЕВЕСНЫЕ ПОРОДЫ
И ПРОЧИЕ ВЕЩЕСТВА**

Таблица 15.24

**Коэффициенты теплопроводности некоторых
строительных материалов и грунтов [3. 5]**

Материал (состав, вес. %)	$\rho, \frac{г}{см^3}$	$t, ^\circ C$	$\lambda, 10^{-6} \frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$
Асфальт	2,1	20	1670
Базальт [4]	—	—	5200
Бетоны (предварительно не просушенные) на легких заполнителях (пемзе) или топливных шлаках	0,6 0,8 1,0 1,2 1,4	20 20 20 20 20	390 560 720 950 1200
Бетоны (предварительно не просушенные) на доменных шлаках	0,6 0,8 1,0 1,2 1,4	20 20 20 20 20	360 500 640 780 940
Бетоны (легкие, предварительно не просушенные) на золах или кирпичном бое	0,6 0,8 1,0 1,2 1,4 1,6	20 20 20 20 20 20	470 640 860 1080 1360 1750
Бетоны ячеистые (пенобетоны) на кварцевом песке (непросушенные)	0,6 0,8 1,0 1,2 1,4	20 20 20 20 20	720 1050 1440 1920 2360
Бетоны ячеистые (пенобетоны) на аморфном песке (предварительно не просушенные)	0,6 0,8 1,0 1,2 1,4	20 20 20 20 20	580 830 1050 1360 1700
Бетон с гравием	—	—	3580
Битум	1,05	20	2300
Боксит	3,2	—	~10 500
Вермкулит	—	—	155
Гипс (или известковый песчанник), высушенный на воздухе	0,6 1,0 1,6 2,0	— — — —	420 750 1470 2500
Глина огнеупорная горшечная	2,0	415	2500
» огнеупорная высокого качества	—	1028	3000
» глиноземистая огнеупорная	2,05 —	345 969	2000 2700
Гранит [4]	1,985 —	423 981	2800 3000
Инфузорная земля	2,6—	—	6400—
Кварциты	2,7	—	8000
Кирпич глиноземистый	—	—	170
99% Al_2O_3	~2,63	—	~11 000
90% Al_2O_3 (без пор)	2,867	137	12 600
90% Al_2O_3	—	1079	5900
90% Al_2O_3	2,980	129	10 200
60% Al_2O_3	—	1089	6170
	2,787	152	5670
	—	1101	4500
	2,307	375	3300
	—	1044	3170

Продолжение табл. 15.24

Материал (состав, вес. %)	$\rho, \frac{г}{см^3}$	$t, ^\circ C$	$\lambda, 10^{-6} \frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$
Кирпич огнеупорный:			
для доменных печей	2,419	367	3900
		1036	4400
для тяжелых условий эксплуатации (35—40% Al_2O_3)	2,195	135	3080
		1047	3360
для сверхтяжелых условий эксплуатации (~44% Al_2O_3)	2,355	1,67	3360
		1091	3750
Кирпич силикатный:			
для тяжелых условий эксплуатации (96,3% SiO_2 ; 0,2% Al_2O_3 ; 2,9% CaO)	1,874	153	3050
		1117	4300
обычный (95,8% SiO_2 ; 0,5% Al_2O_3 ; 2,9% CaO)	1,81	167	2620
		1086	4170
футеровочный (94,9% SiO_2 ; 1,0% Al_2O_3 ; 2,9% CaO)	1,714	167	2400
		1085	3900
изоляционный (пористый), (~92,5% SiO_2)	0,945	106	660
		1086	1900
Кирпич:			
магнезиальный (~93,6% MgO)	2,787	161	24 000
		906	10 200
магнезиально-хромовый (55,6% MgO ; 15,4% Cr_2O_3 ; 14,6% Al_2O_3)	2,787	131	4280
		1080	4300
хромово-магнезиальный (34,2% MgO ; 24,9% Cr_2O_3 ; 21,7% Al_2O_3)	3,012	160	4000
		1097	4280
хромовый (18,2% MgO ; 29,7% Cr_2O_3 ; 34,1% Al_2O_3)	3,108	161	5170
		1127	4670
форстеритовый (50,3% MgO ; 29,5% SiO_2 ; 10,9 Al_2O_3)	2,627	161	4300
		1084	3560
Кремень	2,5	—	4000
Мел (пикардийский)	1,9	—	~2800
Мрамор [4]	2,8	—	~6500
Пегматит	2,7	—	~6400
Порфир	2,65	—	~6400
Руда железная	~4,0	—	~7000

Коэффициенты теплопроводности некоторых теплоизоляционных материалов растительного и искусственного происхождения [3—5]

Материал (состав, вес. %)	$\rho, \frac{г}{см^3}$	$t, ^\circ C$	$\lambda, 10^{-8} \frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$
Асбест волокнистый	0,47	20	375
» прессованный	0,70	20	570
» распушенный	—1,9	20	890
	0,5	20	355
	0,6	20	490
Асбестовая вата	—	—	130
Асбестовый картон	—	—	250
Асбестовая ткань	—	—	300
Ацетилцеллюлоза	1,32	20	455—700
Бумага	—	—	144—308
Вата хлопковая	—	—	62
» шлаковая	0,1—0,8	100	120—330
Войлок	—	—	86—94
Войлок стеклянный	0,1	100	120
» древесный	0,3—0,4	50	195
Воск пчелиный	—	—	89
Гуттаперча	—	—	480
Замша	—	—	150
Ипорка	~0,011	20	84
Камышит прессованный	0,215	—	122
Капок (растительный пух)	—	—	83
Картон	—	—	330
Каучук натуральный	0,086	50	100
Каучук (80% метилвинила; 20% ZnO)	—	—	1070
(80% метилвинила; 20% TiO ₂)	—	—	930
(80% метилвинила; 20% CaCO ₃)	—	—	780
(70% диметила; 18% TiO ₂ ; 12% ZnO)	—	20	1520
Кожа	1,0	50	420—445
Лед	0,9	0	5300
Льноволокно прессованное	0,196	—	110
Льняное полотно	—	—	210
Мазонит	0,355	—	128
Опилки	—	—	120
Пеностекло	0,150	20	120
Песок (морской, $\varnothing_{ср} = 0,2$ мм)	1,63	50	720
Пробка измельченная	0,037	50	95
» прессованная	0,4	—	158
Пряжа хлопковая	—	—	43
Полистирол	1,06	20	195
Резина вулканизованная:			
38% каучука	—	20	700
50% каучука	—	20	530
Сажа	—	100	70
Слюда (перпендикулярно к слоям)	2,5	20	570
Снег уплотненный	—	—	510
Стиропор	0,025	20	92
Тальк (природный магниевый силикат)	2,6	20	~6500
Торф измельченный	0,1	50	133
Фарфор	—	—	2500
Фланель	—	—	230
Целлюлоза	—	—	1100
Целотекс	—	20	120
Шелк	0,1	0	95÷120
Шелковая шерсть	0,058	0	80
Шлак	—	—	2000
Эбонит	—	—	420

Коэффициенты теплопроводности древесины [3, 4]

Приведены коэффициенты теплопроводности древесины в направлении, перпендикулярном к волокнам. Экспериментально установлено, что теплопроводность вдоль волокон в два-три раза выше теплопроводности перпендикулярно к волокнам. Значения λ приведены для содержания воды в древесине 12% веса сухой древесины, что соответствует среднему влагосодержанию древесины в воздухе с влажностью 60% при комнатной температуре. Коэффициент теплопроводности сухой древесины $\lambda \approx 0,0232 + 0,174 \rho$, $вт/(м \cdot град)$, где ρ — плотность древесины, $г/см^3$.

Порода дерева	$\rho, \frac{г}{см^3}$	$\lambda, \frac{вт}{м \cdot град}$
Бальзовое	~0,125	0,045
Береза	~0,72	0,15
Береза желтая	0,68	0,117
Дуб	~0,85	0,171
Дуб белый	0,74	0,139
» красный	0,72	0,138
Ель аляскинская	0,425	0,079
Ильм белый	0,52	0,105
Кедр красный	0,47	0,095
» красный западный	0,4	0,082
Кипарис красный	~0,385	0,099
Клен белый	0,63	0,12
» черный	0,71	0,134
Лиственница	~0,6	0,128
Лиственница западная	0,62	0,114
Пихта	—	0,037
» (вдоль слоев)	—	0,127
» дугласова	0,53	0,089
» колорадская	0,4	0,075
Пробковое	—	0,04
Секвойя	0,5	0,11
Сосна белая	0,44	0,095
» желтая длиннохвойная	0,61	0,11
» » короткохвойная	0,54	0,111
» норвежская	0,48	0,096
» пондозова	0,49	0,096
» сахарная	0,41	0,080
Тополь	~0,45	0,100
Фанера	—	0,125
Хемлок восточный	0,46	0,093
» калифорнийский	0,46	0,087
Ясень	~0,7	0,145
Ясень белый	0,64	0,12

Коэффициенты теплопроводности стекол [3, 10]

Название	$\rho, \frac{г}{см^3}$	$t, ^\circ C$	$\lambda, \frac{вт}{м \cdot град}$
Бетол	—	—78	0,129
Викор	—	20	1,32
Крон бариево-фосфатный	—	45	0,758
» боросиликат	—	—150	0,494
		45	1,13
		100	1,36
» калийно-фосфатный	—	45	0,825
» обыкновенный	—	45	1,00
» фосфат	—	0	0,753
Кварц плавленый	—	100	1,46
Сера плавленная	—	0	0,197
Пирекс	2,23	20	1,14
Стекло:			
А	2,22	20	1,13
В	2,27	20	1,13
С	2,45	20	1,07
Д	2,52	20	1,00
Е	2,42	20	1,00
Г	2,55	20	1,10
Н	3,19	20	0,829
И	3,18	20	0,749
К	3,55	20	0,749
кремнеземное	—	0	1,390
Л	6,10	20	0,536
Флинт обыкновенный	—	0	0,795
» тяжелый	—	0	0,783
Хрусталь	1~2,72	20	0,896

Таблица 15.28

Коэффициенты теплопроводности масел и некоторых продуктов перегонки нефти

Вещество	$t, ^\circ C$	$\lambda, \frac{вт}{м \cdot град}$	Литература
Бензин Б-70	—50	0,131	[1]
	50	0,1105	[1]
Вазелин	25	0,184	[4]
Газолин	30	0,138	[3]
Глицерин	20	~0,276	[1, 3, 4]
Керосин Т-1	—50	0,127	[1]
	0	0,119	[1]
	150	0,0965	[1]
Масло касторовое	20	0,178	[4]
» оливковое	20	0,165	[4]
» парафиновое	30	0,123	[3]
» трансформаторное № 1	30	0,132	[3]
» » № 3	30	0,124	[3]
» Ministry of works	25	0,108	[3]
» Medium cylinder oil	30	0,153	[3]
» Mobiloil B	30	0,157	[3]
» Rabbeth Spindle oil	30	0,143	[3]
» Red oil	30	0,141	[3]
» Velocite B	30	0,143	[3]
Нефть	—	0,140	[4]
Парафин	30	0,123	[1, 3]
Парафин медицинский	30	0,118	[3]
Топливо дизельное	20	0,117	[1]

Коэффициенты теплопроводности некоторых диэлектрических монокристаллов и кристаллических тел [3]

Кристалл	Химическая формула	Температура плавления $T_{пл}, ^\circ K$	$\lambda, \frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$ при $t = T_{пл}$	$\lambda, \frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$ при $t = 0 ^\circ C$
Алмаз	C	3950	0,104	1,5
Бромистый аммоний	NH ₄ Br	815	0,00215	0,0064
Бромистый калий	KBr	1003	0,0027	0,0100
Бромистый натрий	NaBr	1029	0,00215	0,00809
Иодистый калий	KI	953	0,0021	0,0073
» рубидий	RbI	915	0,0037	0,0122
Кальцит	CaCO ₃	1612	0,00172	0,0102
Корунд	Al ₂ O ₃	2323	0,00775	0,0659
Кремнезем (кварц)	SiO ₂	1900	0,00477	0,0332
Магнезия	MgO	2773	0,0139	0,1408
Нитрат бария	Ba(NO ₃) ₂	868	0,00131	0,00417
Оксид бериллия	BeO	2843	0,035	0,364
Сернистый цинк	ZnS	1850	0,0115	0,0778
Фтористый барий	BaF ₂	1573	0,00502	0,0289
Фтористый калий	KF	1129	0,00407	0,0168
Фтористый кальций	CaF ₂	1634	0,00437	0,0262
Фтористый литий	LiF	1143	0,00675	0,0282
Хлорат натрия	NaClO ₃	550	0,00152	0,00306
Хлористый аммоний	NH ₄ Cl	793	0,00207	0,00602
Хлористый калий	KCl	1050	0,0064	0,0245
Хлористый натрий	NaCl	1074	0,00605	0,0237
Хлористый рубидий	RbCl	987	0,0029	0,0105

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Изд. 2-е. М., «Наука», 1972.
2. Рид Р., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. Пер. с англ. М., Гостоптехиздат, 1964.
3. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. Пер. с франц., М., «Мир», 1968.
4. Handbook of Chemistry and Physics. Chemical rubber publishing Co., Cleveland, Ohio, s. a.
5. Кэй Дж., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. Пер. с англ. Под ред. К. П. Яковлева. М., Физматгиз, 1962.
6. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М., Атомиздат, 1968.
7. Техника высоких температур. Под ред. И. Э. Кэмпбелла. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
8. Landolt-Börnstein. Physikalisch-Chemische Tabellen. Berlin, 1931.
9. Gmelins Handbuch der Anorganischen Chemie. Berlin, Weinheim, 1927—1959.
10. Техническая энциклопедия. Справочник. Т. 7. М., «Советская энциклопедия», 1931.

ГЛАВА 16[°] ВЯЗКОСТЬ

Сила сопротивления сдвигу τ , возникающая при относительном движении двух слоев жидкости или газа, пропорциональна градиенту скорости v в направлении нормали к потоку жидкости или газа:

$$\tau = \eta dv/dn.$$

Коэффициент пропорциональности η называют *динамической вязкостью*. В системе СГС динамическая вязкость измеряется в $\text{г}/(\text{см} \cdot \text{сек})$, в системе СИ — в $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{сек})$.

Величина ϕ , обратная динамической вязкости, называется *текучестью*. Единица текучести в системе СИ — $\text{м}^2/(\text{н} \cdot \text{сек})$.

Кинематическая вязкость называется отношение динамической вязкости η к плотности жидкости ρ :

$$\nu = \eta/\rho.$$

В системе СГС кинематическая вязкость измеряется в $\text{см}^2/\text{сек}$, в системе СИ — в $\text{м}^2/\text{сек}$.

Для газов зависимость η от абсолютной температуры T определяется формулой

$$\eta_T = \eta_{T_0} \sqrt{\frac{T}{T_0}} \frac{1 + C/T_0}{1 + C/T},$$

где C — постоянная Сезерленда.

16.1. ВЯЗКОСТЬ ГАЗОВ И ПАРОВ ПРИ ДАВЛЕНИИ ВЫШЕ АТМОСФЕРНОГО

Таблица 16.1

Вязкость водорода η , $10^{-8} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{сек})$ [1]

P , атм	Температура, °C						
	15	25	50	100	150	200	250
1	866	886	935	1030	1125	1210	1295
50	875	895	943	1040	1130	1215	1300
100	885	905	952	1050	1140	1220	1305
200	910	931	977	1070	1155	1235	1315
300	943	960	1005	1090	1175	1250	1330
400	975	994	1035	1115	1195	1265	1340
500	1010	1030	—	1140	1215	1283	1355
600	1050	—	—	1165	1235	1300	1370
800	1120	—	—	1220	1280	1335	1400

Таблица 16.2

Вязкость азота η , $10^{-8} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{сек})$ [1]

P , атм	Температура, °C							
	0	25	50	75	100	150	200	300
1	1665	1775	1880	1985	2090	2280	2460	2640
20	1695	1805	1905	2010	2115	2300	2480	2655
50	1760	1860	1955	2050	2155	2340	2510	2680
100	1905	1985	2060	2145	2230	2400	2565	2730
150	2090	2135	2180	2245	2325	2475	2630	2780
200	2300	2305	2325	2370	2430	2565	2700	2845
300	2750	2680	2645	2655	2675	2760	2860	2980
400	3200	3075	2995	2965	2940	2970	3025	3120
500	3675	3460	3335	3260	3220	3190	3210	3275
600	4125	3850	3670	3565	3490	3405	3390	3430
700	—	4225	3995	3865	3765	3630	3580	3590
800	—	4580	4325	4160	4030	3850	3770	3750

Таблица 16.3

Вязкость кислорода η , $10^{-8} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{сек})$ [1]

P , атм	Температура, °C			P , атм	Температура, °C	
	15	50	100		15,8	54,8
1	1993	2182	2437	1	1997,5	2207
22	2013	2211	2460	20	2024,0	—
42	2055	2249	2490	50	2093,5	2288
62	2114	2295	2525	100	2250,0	2434
82	2188	2345	2564	150	2451,5	2610
102	2269	2401	2608	200	2688,5	—
122	2351	2463	2655	300	3220	—
				400	3769	—
				500	4330	—
				600	4862,0	—
				700	5392,0	—

Таблица 16.4

Вязкость гелия η , $10^{-8} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{сек})$ [1]

P , атм	Температура, °C			
	—50,1	—24,8	0,0	25,0
69,05	1601	1724	1855	1990
137,1	1622	1734	1853	1983
205,15	1654	1758	1876	2007
273,2	1668	1781	1884	2015
409,25	1734	1839	1931	2042
545,4	1794	1880	1993	2103
681,5	1879	1971	2068	2154

Таблица 16.5

Вязкость аргона η , $10^{-8} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{сек})$ [1]

P , атм	Температура, °C					
	0	15	25	50	100	200
1	2095	2190	2250	2400	2695	3225
25	2180	2265	2320	2465	2745	3265
50	2290	2370	2425	2555	2815	3330
100	2585	2640	2680	2780	2995	3440
150	2910	2920	2935	3010	3195	3570
200	3265	3225	3225	3265	3390	3715
300	4030	3885	3830	3780	3800	4000
400	4865	4625	4510	4355	4220	4290
475	—	—	—	—	—	4520

Таблица 16.6

Вязкость воздуха η , 10^{-8} кг/(м·сек) [1]

P , атм	Температура, °C						
	0	14	16	25	50	90	100
1	1720	1786	1795	1837	1955	2135	2180
20	—	1816	1825	—	1980	2170	—
50	1815	1877	1885	1922	2032	2200	2240
100	1970	2018	2025	2060	2150	2298	2335
150	2165	2190	2195	2215	2280	2390	2420
200	2370	2382	2385	2395	2435	2510	2530
250	2605	2589	2590	2590	2600	2640	2650
300	2860	2820	2815	2800	2780	2800	2810

Таблица 16.7

Вязкость окиси углерода η , 10^{-8} кг/(м·сек) [1]

P , атм	Температура, °C						
	0	25	50	100	150	200	250
2	1660	1765	1870	2075	2270	2450	2625
20	1690	1795	1900	2105	2290	2470	2645
50	1750	1850	1945	2145	2320	2500	2670
100	1895	1990	2050	2225	2385	2560	2715
150	2080	2140	2175	2320	2465	2630	2770
200	2300	2305	2315	2430	2550	2710	2830
300	2740	2680	2640	2680	2765	2870	2970
400	3175	3065	2985	2950	2970	3035	—
500	3600	3450	3330	3225	3185	3200	—
600	—	3825	3660	3490	3405	3400	—
800	—	4550	4300	4010	3820	3760	—

Таблица 16.8

Вязкость углекислого газа η , 10^{-8} кг/(м·сек) [1]

P , атм	Температура, °C								
	20	30	40	60	90	100	150	200	250
1	1463	1510	1560	1 650	1790	1825	2045	2254	2456
20	1560	1590	1630	—	1820	1855	2075	2280	2485
50	1850	1830	1805	—	1900	1950	2140	2340	2540
70	2320	2500	2120	—	2030	2040	2190	2385	2590
80	2680	5310	2470	—	2110	2100	2220	2420	2610
90	8000	5980	3350	—	2200	2160	2250	2450	2640
100	8280	6500	4875	—	2300	2240	2290	2480	2665
120	8820	7300	6030	—	2590	2440	2390	2540	2730
150	9520	8080	6950	4650	3120	2850	2560	2660	2810
200	10400	9090	8000	6020	4190	3800	2980	2900	2980
250	11170	9930	8850	6980	5130	4700	3480	3200	3180
300	11820	10610	9590	7810	5960	5470	3980	3540	3380
400	12960	11780	10800	9130	7300	6780	4980	4260	3890
500	14000	12860	11850	10230	8400	7880	5920	4960	4440
600	15000	13850	12820	11200	9370	8800	6760	5640	5020
700	—	14840	13720	12110	10200	9620	7530	6280	5570
800	—	15600	14600	12950	11000	10400	8250	6900	6100

16.2. ВЯЗКОСТЬ ГАЗОВ ПРИ ДАВЛЕНИИ НИЖЕ АТМОСФЕРНОГО

Таблица 16.9

Вязкость η газов при давлении ниже атмосферного, 10^{-8} кг/(м·сек)

Водород				Гелий				Неон				Воздух		Углекислый газ	
55,05°K		20,4°K		90,27°K		14,62°K		90,08°K		20,42°K		15°С		15°С	
P , мм рт. ст.	η	P , мм рт. ст.	η	P , мм рт. ст.	η	P , мм рт. ст.	η	P , мм рт. ст.	η	P , мм рт. ст.	η	P , мм рт. ст.	η	P , мм рт. ст.	η
760	394,1	700	110,7	760	910	760	293,7	300	1344	300	359,3	750	1810	750	1490
7,31	391,0	7,19	111,8	15,4	907	3,32	293,7	9,51	1340,6	3,71	359,3	380	1828	380	1490
1,542	382,3	0,899	110,3	1,876	861,8	0,472	285,4	2,186	1303,4	0,696	344,1	20,5	1817	20	1480
0,569	356,4	0,120	101,6	0,885	816,2	0,1258	260,4	1,149	1267,7	0,217	333,9	0,978	1770	2	1470
0,260	319,2	0,0562	92,5	0,416	729,6	0,0528	221,0	0,600	1209,5	0,097	316,5	0,956	1730	0,6	1380
0,116	259,9	0,0237	74,3	0,228	620,9	0,0189	142,9	0,312	1105,4	0,0246	244,1	0,908	1643	—	—
0,0568	185,8	0,0113	52,3	0,049	275,9	0,00704	64,43	0,0772	696,5	0,0111	165,6	—	—	—	—
0,0112	56,2	0,00414	22,81	0,0105	66,9	—	—	0,0222	313,9	0,005	92,5	—	—	—	—
0,00514	23,75	0,00214	11,78	0,0057	36,67	—	—	0,0052	77,5	0,0218	39,8	—	—	—	—

16.3. ВЯЗКОСТЬ ГАЗОВ И ПАРОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ [1]

Таблица 16.10

Вязкость η газов и паров в интервале температур от -220 до 1000°C , 10^{-8} кг/(м·сек)

Температура, °C	Азот N_2	Окись азота NO	Закись азота N_2O	Аммиак NH_3	Аргон Ar	Водо- род H_2	Водя- ной пар H_2O	Воз- дух	Гелий He	Кисло- род O_2	Крип- тон Kr	Ксенон Xe	Метан CH_4	Неон Ne	Серни- стый газ SO_2	Угле- кислый газ CO_2	Окись углеро- да CO	Этан C_2H_6	Этилен C_2H_4
-220	—	—	—	—	470	—	—	—	640	—	—	—	—	858	—	—	—	—	—
-210	—	—	—	—	550	—	—	—	716	—	—	—	—	1008	—	—	—	—	—
-200	—	—	—	—	630	332	—	520	790	—	—	—	—	1149	—	—	—	—	—
-190	—	—	—	—	710	367	—	—	862	635	—	—	—	1280	—	—	—	—	—
-180	650	—	—	—	790	399	—	663	930	710	—	—	336	1400	—	—	—	—	—
-170	718	—	—	—	870	430	—	730	995	785	—	—	414	1510	—	—	—	—	—
-160	783	—	—	—	950	460	—	800	1055	860	—	—	453	1615	—	—	—	—	—
-150	846	860	—	—	1025	488	—	860	1117	935	—	—	490	1720	—	—	—	—	—
-140	907	930	—	—	1105	516	—	922	1176	1010	—	—	528	1819	—	—	—	—	—
-130	967	1000	—	—	1180	542	—	990	1235	1085	—	—	566	1315	—	—	—	—	—
-120	1028	1064	—	—	1255	568	—	1050	1290	1150	—	—	603	2005	—	—	1030	—	—
-110	1082	1130	—	—	1325	593	—	1109	1345	1218	—	—	640	2095	—	—	1090	—	—
-100	1143	1198	—	—	1405	618	—	1170	1400	1286	—	—	677	2182	—	886	1130	552	—
-75	1285	1357	990	870	1585	677	—	1312	1526	1452	—	—	769	2388	855	1007	1275	915	623
-50	1419	1510	1115	760	1760	733	—	1445	1640	1612	—	—	860	2600	955	1126	1400	1022	703
-25	1542	1656	1240	850	1930	788	—	1582	1750	1753	—	—	946	2788	1053	1247	1528	1126	780
0	1665	1800	1360	935	2085	840	883	1708	1860	1910	2330	2110	1028	2975	1158	1367	1662	1223	855
20	1766	1899	1460	1000	2215	880	—	1812	1946	2026	2480	2255	1092	3113	1250	1463	1749	1290	915
25	1778	1920	1482	1025	2248	890	975	1840	1968	2052	2515	2290	1168	3142	1270	1486	1766	1319	929
50	1883	2035	1595	1110	2400	938	1065	1954	2065	2182	2695	2470	1185	3310	1390	1607	1872	1410	1020

Температура, °C	Азот N ₂	Оксид азота NO	Закись азота N ₂ O	Аммиак NH ₃	Аргон Ar	Водород H ₂	Водяной пар H ₂ O	Воздух	Гелий He	Кислород O ₂	Криптон Kr	Ксенон Xe	Метан CH ₄	Неон Ne	Сернистый газ SO ₂	Углекислый газ CO ₂	Оксид углерода CO	Этан C ₂ H ₆	Этилен C ₂ H ₄
75	1986	2156	1712	1205	2550	985	1157	2068	2175	2310	2880	2645	1260	3482	1500	1716	1980	1500	1070
100	2086	2272	1822	1285	2695	1033	1250	2180	2281	2437	3060	2820	1332	3646	1611	1827	2076	1590	1150
150	2278	2475	2040	1463	2965	1123	1435	2391	2475	2674	3400	3165	1472	3950	1830	2045	2271	1750	1280
200	2464	2682	2245	1648	3223	1213	1615	2558	2672	2867	3725	3484	1604	4248	2040	2254	2452	1910	1410
250	2639	2870	2450	1820	3462	1299	1800	2760	2875	3103	4040	3790	1725	4527	2255	2456	2622	2055	1525
300	2800	3055	2649	1990	3680	1382	1985	2942	3055	3310	4325	4080	1850	4785	2455	2646	2788	2200	1640
400	3118	3400	3030	2337	4110	1538	2350	3275	3415	3686	4850	4620	2080	5300	2820	2994	3090	2480	1900
500	3403	3700	3375	2650	4505	1686	2720	3567	3750	4030	5350	5120	2268	5796	3155	3309	3370	2700	2140
600	3665	4010	—	2925	4870	1828	3090	3842	4070	4350	5840	5600	2465	6255	3465	3605	3630	2940	2380
700	3916	4275	—	3210	5215	1965	3460	4110	4370	4652	—	—	2650	6689	3760	3876	3870	—	—
800	4160	4535	—	3480	5550	2103	3820	4365	4660	4940	—	—	2820	7100	4040	4140	4100	—	—
1000	4600	5075	—	3990	6160	2355	4560	4850	5240	5470	—	—	3135	7855	4540	4658	4530	—	—

Вязкость η газов и паров в интервале температур от 0 до 700°C, 10^{-8} кг/(м·сек) [1]

Таблица 16.11

Температура, °C	Ацетон C ₃ H ₆ O ₂	Ацетилен C ₂ H ₂	Бензол C ₆ H ₆	Бром Br ₂	Бромная ртуть HgBr ₂	n-Бутан C ₄ H ₁₀	Бутан C ₄ H ₁₀	α -Бутен (1-бутен) C ₄ H ₈	β -Бутен (2-бутен) C ₄ H ₈	Водород бромистый HBr	Водород йодистый HI	Водород хлористый HCl	Водород фосфористый PH ₃	n-Гексан C ₆ H ₁₄	n-Гептан C ₇ H ₁₆	Диметиловый эфир (C ₂ H ₅) ₂ O	Диэтиловый эфир (C ₂ H ₅) ₂ O	Дифенилметан C ₁₂ H ₁₀	Дифениловый эфир (C ₆ H ₅) ₂ O
0	685	955	693	1390	—	682	690	708	694	1710	1700	1320	1072	600	—	870	680	—	—
20	735	1017	746	1495	—	735	744	761	746	1843	1830	1425	1150	644	—	925	730	—	—
25	750	1033	758	1520	—	749	739	775	759	1877	1862	1450	1171	654	—	942	742	—	—
50	815	1110	822	1645	—	814	—	841	825	2040	2020	1580	1264	710	618	1020	808	605	610
75	880	1188	886	1770	—	881	—	906	889	2200	2172	1705	1358	765	667	1095	870	653	657
100	945	1265	950	1890	—	947	—	971	952	2365	2323	1830	1451	820	716	1168	930	700	703
150	1076	1417	1077	2135	—	1070	—	1098	1076	2690	2625	2070	1635	930	810	1315	1050	796	797
200	1210	—	1202	2380	2253	1185	—	1228	1192	3010	2923	2302	1818	1040	900	1465	1172	888	888
250	1340	—	1326	2625	2487	1300	—	1355	1301	—	3216	2530	—	1150	985	1610	1290	976	978
300	1466	—	1453	2865	2725	1420	—	1483	1410	—	3510	2755	—	1260	1072	1750	1405	1063	1064
400	1720	—	1690	3340	3190	—	—	—	—	—	—	—	—	1475	—	2040	1640	1228	1238
500	1975	—	1926	3815	3664	—	—	—	—	—	—	—	—	1685	—	—	—	1390	—
600	—	—	2170	4290	4120	—	—	—	—	—	—	—	—	1900	—	—	—	1550	—

[illegible]

Продолжение табл. 16.11

[illegible]

Продолжение табл. 16.11

Температура, °C	Тиазол C_4H_3N	Тиофен C_4H_4S	2, 2', 3-триметил- бутан C_7H_{16}	Триметиламин C_3H_9N	Черный бороксовый окислитель $SnCl_4$	Черный бороксовый окислитель $SnCl_4$	Черный бороксовый окислитель $SnCl_4$	Циан C_2N_2	Циановодород HCN	Циклогексан C_6H_{12}	Циклопентан C_5H_{10}	Цинк Zn	Уксусная кислота $C_2H_4O_2$	Хлор Cl_2	Хлороформ $CHCl_3$	Этилалкоголь $C_4H_{10}O$	Этиловый спирт C_2H_5OH	Этилформиат $C_3H_6O_2$	Этилхлорид C_2H_5Cl
0	910	755	—	639	906	933	672	653	808	—	—	—	—	1245	933	960	775	—	911
20	958	614	—	686	966	1002	737	701	870	—	—	—	—	1335	1000	743	835	890	978
25	972	628	—	698	982	1020	754	712	884	—	—	—	—	1360	1017	756	850	906	994
50	1034	901	—	754	1061	1108	834	770	960	—	—	—	825	1465	1100	820	930	990	1080
75	1098	973	—	820	1141	1194	914	817	1038	—	—	—	912	1570	1182	884	1010	1074	1164
100	1160	1045	—	886	1330	1279	994	878	1113	—	—	—	1000	1675	1265	949	1083	1158	1247
150	1285	1190	—	1102	1485	1452	1150	986	1265	—	—	—	1170	1882	1430	1078	1230	1325	1410
200	1410	1333	—	—	1640	—	1305	1090	1414	—	—	—	1340	2090	1590	1206	1375	—	1574
250	1535	1472	—	—	1770	—	1460	1191	—	—	—	—	1510	2295	1750	1206	1512	—	1736
300	1658	1612	—	—	1945	—	1613	1291	—	—	—	—	1670	2505	1906	1333	1650	—	1900
400	—	—	—	—	2112	—	1920	1482	—	—	—	—	1980	2920	2205	1462	1920	—	2225
500	—	—	—	—	2468	—	—	1670	—	—	—	—	—	3326	—	1710	2200	—	—
600	—	—	—	—	2818	—	—	1860	—	—	—	—	—	3730	—	1960	—	—	—
700	—	—	—	—	3160	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Вязкость сжиженных газов, 10^{-8} кг/(м·сек) [1]

Азот		Аммиак		Аргон		Водород		Гелий		Гелий		Воздух		Иодистый водород		Бромистый водород	
Т°К	η	Т°К	η	Т°К	η	Т°К	η	Т°К	η	Т°К	η	Т°К	η	Т°К	η	Т°К	η
63,9	292	188,16	147,9	84,2	280	14,85	21,62	1,282	0,154	2,178	2,30	90,1	132	223,3	1418	186,8	874
64,4	290	193,16	141,1	86,25	262	15,89	19,32	1,304	0,124	2,29	1,87	107,2	94,5	225,6	1394	188,8	865
64,8	284	198,16	134,5	86,9	256	16,35	18,49	1,335	0,179	2,315	1,97	111,0	90	227,2	1378	190,8	854
69,1	231	223,16	317	87,3	252	17,77	15,93	1,586	0,233	2,642	2,35	125,1	82,5	229,6	1368	193,7	841
69,25	228	233,16	276			18,78	14,48	1,762	0,356	2,934	2,40	126,4	80,5	231,5	1345	197,3	822
71,4	209	237,16	255			20,43	19,00	1,906	0,675	3,738	2,75			233,9	1321	199,4	816
76,1	165	283,16	162,4					1,988	0,960	3,81	2,87			236,4	1298		
77,33	158	288,16	155,5					2,086	1,15	3,97	2,88						
		298,16	148					2,111	1,26	4,021	2,98						
								2,116	1,35								
								2,145	1,55								
								2,159	1,77								
								2,171	2,02								
								2,174	1,95								

Продолжение табл. 16.12

Кислород		Метан		Оксид углерода		Пропан		Пропилен		Сероводород		Хлористый водород		Этан		Этилен	
Т°К	η	Т°К	η	Т°К	η	Т°К	η	Т°К	η	Т°К	η	Т°К	η	Т°К	η	Т°К	η
54,4	873	111,2	98	73,2	224	83,5	1353	88,7	1446	191,0	525	160,8	566	172,8	175	183,8	135
54,5	863	125,9	90	75,2	203	85,1	1154	89,8	1273	193,3	506	166,7	546	186,0	137	204,6	115
54,6	821	134,2	82	77,8	186	86,6	988	90,1	1240	198,2	489	171,7	508	201,0	114	226,4	92
54,9	772	154,6	67	82,8	165	88,1	866	94,3	784	201,2	468	177,0	493	215,4	97	252,2	72
56,4	717	167,1	63,5	90,1	146	89,8	738	98,0	537	206,1	451	183,2	473	230,0	90	273,1	64
57,1	638	168,4	62,5	99,6	116	93,1	609	102,6	358	209,8	435	188,2	457	231,8	92		
57,4	638			111,6	100	96,8	459	106,9	273					243,4	82		
59,7	631			129,6	66	101,6	358	111,1	215					247,6	76		
61,7	521					106,7	257	119,0	155					270,0	67		
63,5	476					107,8	249							273,1	63		
68,9	377													288,9	55		
72,3	323																
77,4	273																
80,0	250																
90,1	190																

16.4. ВЯЗКОСТЬ ВОДЯНОГО ПАРА

Продолжение табл. 16.13

Таблица 16.13

Вязкость η водяного пара в зависимости от температуры и давления, 10^{-7} кг/(м·сек) [1]

Температура t , °С	Давление, атм								
	Насыщения								
		1	20	40	60	80	100	150	200
100	124	124	—	—	—	—	—	—	—
120	133	132	—	—	—	—	—	—	—
140	142	140	—	—	—	—	—	—	—
160	152	148	—	—	—	—	—	—	—
180	163	155	—	—	—	—	—	—	—
200	175	163	—	—	—	—	—	—	—
220	188	171	184	—	—	—	—	—	—
240	201	179	190	—	—	—	—	—	—
260	217	186	196	211	—	—	—	—	—

Температура t , °С	Давление, атм								
	Насыщения								
		1	20	40	60	80	100	150	200
280	235	194	203	217	232	—	—	—	—
300	257	202	210	223	236	250	—	—	—
320	282	209	217	230	242	255	268	—	—
340	318	217	225	236	248	261	272	318	—
360	365	225	232	243	254	266	278	308	—
380	—	232	240	250	261	272	283	311	361
400	—	240	247	257	268	279	289	316	354
420	—	247	254	264	275	284	295	322	354
440	—	254	262	271	282	291	302	329	358
460	—	262	269	279	288	298	308	335	363
480	—	269	277	285	294	304	315	342	370
500	—	277	284	292	301	311	322	349	380

16.5. КОНСТАНТЫ СЕЗЕРЛЕНДА

Таблица 16.14

Значения константы Сезерленда C [1—3]

Газ	C	Интервал температур, °C	Газ	C	Интервал температур, °C	Газ	C	Интервал температур, °C
Азот	103,9	25—280	<i>n</i> -Гексан	436,1	121—307	Пиридин	320	98—265
	104,7	20—825	Дициан	330	20—100	Пропан	278	20—250
Азота закись	260	25—280	Диэтилэфир	404	122—309		290	25—280
Азота окись	128	20—250	Дифенил-метан	387	166—360	Пропилен	321,6	20—120
Аммиак	503	20—300	Дифенилэфир	400	176—362	<i>n</i> -Пропиловый спирт	515,6	122—273
Аргон	142	20—827	Изоамилен	368	20—120	Ртуть	942	220—610
Ацетилен	198,2	20—120	Изобутан	368	20—120	Сернистый газ	306	300—825
Ацетон	541,5	119—306	Изобутилен	339	20—120	Сероводород	331	0—100
Бензол	447,5	130—313	Изопропиловый спирт	459,9	119—308	Сероуглерод	499,5	114—310
Бром	533	190—600	Иод	568	106—523	Тиофен	467	20—245
Бромистый водород	375	0—100	Иодистый водород	390	0—100	Толуол	370	60—250
Бромная ртуть	657	219—582	Иодная ртуть	717	282—512	Фосфористый водород	290	0—100
<i>n</i> -Бутан	377,4	20—120	Кадмий	1053	506—627	Углерода двуокись	254	25—280
α -Бутилен	328,9	20—120	Кислород	126,6	20—280		213	300—824
β -Бутилен	362,1	20—120		125	15—630	Углерода окись	101,2	22—277
Воздух	106,8	20—280	Криптон	188	0—100	Углерод четыреххлористый	335	50—250
	111	16—825	Ксенон	252	0—100		365,4	128—315
Водород	73	20—200	Мезителен	136,3	100—200	Хлор	351	20—250
	86	100—200	Метан	162	20—500	Хлористый водород	360	0—250
	105	200—250	Метилацетат	501,8	143—307	Хлороформ	373	121—308
Водяной пар	234	713—822	Метилбромид	379	20—120	Циан	330	0—100
Гелий	673	100—350	Метиловый спирт	486,9	111—312	Цианистый водород	901	20—330
	83	100—200	Метилтиофен	400	50—250	Цинк	876	600—680
	95	200—250	Метиленхлорид	425	22—309	Цинк четыреххлористый	432	107—592
<i>n</i> -Гептан	173	682—815	Метилхлорид	441	20—308	Цинк четырехбромистый	525	105—578
	445	100—252	Метилэфир	345	20—120	Циклопропан	372	20—120
			Мышьяковистый водород	300—	0—100	Циклогексан	350,9	122—306
			Неон	61	20—100	Этан	252	20—250
				70	100—200	Этилацетат	504	128—314
				82	200—250	Этилен	225	20—250
				128	686—827			
			<i>n</i> -Нонан	276	100—250			
			<i>n</i> -Октан	337	100—250			
			<i>n</i> -Пентан	382,8	122—306			

16.6. ВЯЗКОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ И НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Продолжение табл. 16.15

Таблица 16.15

Вязкость η простых веществ. 10^{-3} кг/(м·сек) [2]

$t, ^\circ\text{C}$	η	$t, ^\circ\text{C}$	η
Ag		Br ₂	
1167	3,02	0	1,253
1200	2,98	5	1,178
		10	1,107
Bi		15	1,045
304	1,662	20	0,992
451	1,271	25	0,941
600	1,000	30	0,855
601	0,996		

$t, ^\circ\text{C}$	η	$t, ^\circ\text{C}$	η
Br ₂		Cu	
40	0,817	1085	3,36
45	0,780	1100	3,33
50	0,746	1150	3,22
55	0,715	1200	3,12
60	0,686	97,5% Fe; 2,5% C	
Cd		1350	2,65
349	1,44	1400	2,25
406	1,34	97% Fe; 3% C	
466	1,27	1300	2,800
506	1,18	1350	2,375
550	1,15	1400	2,025
603	1,10		

Вязкость η неорганических соединений, 10 ⁻³ кг/(м·сек) [2]			
$t, ^\circ\text{C}$	η	$t, ^\circ\text{C}$	η
96,5% Fe; 3,5% C		Pb	
1250	2,90	650	1,438
1300	2,40	700	1,356
1350	2,00	750	1,29
1400	1,75	800	1,23
96% Fe; 4% C		850	1,18
1250	2,10	S*	
1300	1,75	123	10,94
1350	1,55	135,5	8,66
1400	1,45	149,5	7,09
Hg		156,3	7,19
-20	1,855	158,2	7,59
-10	1,764	159,2	9,48
0	1,685	159,5	14,45
10	1,615	160,0	22,83
20	1,554	160,3	77,32
30	1,499	165	0,5·10 ³
40	1,450	171	4,5·10 ³
50	1,407	184	16·10 ³
60	1,367		
70	1,331	190,5	19,7·10 ³
80	1,298	197,5	21,3·10 ³
90	1,268	200	21,5·10 ³
100	1,240	210	20,5·10 ³
110	1,214	217	19,1·10 ³
120	1,191	220	18,6·10 ³
130	1,169	Sb	
140	1,149	650	1,50
150	1,130	700	1,26
200	1,052	750	1,16
250	0,995	800	1,08
300	0,950	850	1,05
340	0,921	Sn	
K		240	1,91
100	0,466	260	1,82
150	0,382	280	1,74
200	0,324	300	1,67
Na		350	1,51
100	0,814	400	1,38
132	0,742	450	1,27
183	0,635	500	1,18
P		550	1,11
43,2	1,73	600	1,05
45,05	1,70	650	0,99
48,1	1,64	700	0,94
50,5	1,60	750	0,91
53,65	1,55	800	0,87
60,2	1,45	Zn	
69,7	1,32	450	3,168
79,9	1,21	500	2,779
Pb		550	2,476
300	2,649	600	2,233
400	1,315	650	2,033
450	2,057	700	1,865
500	1,850		
550	1,681		
600	1,540		
$t, ^\circ\text{C}$	η	$t, ^\circ\text{C}$	η
AgBr		460	1,596
609	1,863	480	1,476
649	1,661	500	1,380
688	1,487	520	1,301
770	1,217	540	1,239
803	1,192	550	1,211
AgCl		KOH	
603	1,606	400	2,3
632	1,466	450	1,7
669	1,372	500	1,3
734	1,186	550	1,0
AgI		600	0,8
605	3,026	LiNO ₃	
630	2,748	260	6,477
698	2,375	270	6,260
730	2,123	291	6,476
827	1,556	300	5,058
BiCl ₃		310	4,696
260	23,0	322	4,318
270	29,5	LiNO ₃	
280	27,0	330	4,240
290	25,0	354	3,630
300	30,0	390	2,490
320	20,5	429	2,054
340	18,0	MgCl ₂	
CaCl ₂		808	4,120
800	4,940	N ₂ H ₄	
HgBr ₂		5	1,21
240	331	10	1,12
247	2,97	15	1,04
258	1,97	20	0,97
KBr		25	0,91
745	1,48	N ₂ O ₄	
775	1,34	0,72	0,5220
805	1,19	5,09	0,4954
KCl		9,15	0,4720
790	1,42	15,36	0,4401
835	1,21	Na ₃ AlF ₆	
920	0,99	1000	2,800
1035	0,71	NaBr	
K ₂ Cr ₂ O ₇		762	1,42
400	13,16	766	1,35
410	12,41	780	1,28
420	11,71	NaCl	
430	11,05	825	1,432
440	10,42	850	1,275
450	9,80	875	1,138
460	9,20	900	1,017
470	8,62	925	0,912
480	8,06	950	0,820
490	7,52	975	0,752
500	6,99	1000	0,704
510	6,49	315	2,916
KNO ₃		320	2,826
350	2,728	340	2,527
360	2,578	360	2,283
380	2,312	380	2,077
400	2,094	400	1,895
420	1,905	420	1,741
440	1,738		

* Значения η до 160,3°C определены для очищенной, но не обезгаженной серы, остальное — для обезгаженной.

$t, ^\circ\text{C}$	η	$t, ^\circ\text{C}$	η
NaNO_3		452	5,38
440	1,616	472	4,70
460	1,518	492	4,07
NaOH		PbCl_2	
350	4,0	498	5,53
400	2,8	518	4,66
450	2,8	538	4,02
500	1,8	558	3,59
550	1,5	578	3,28
NaPO_3		598	3,06
650	1250	608	2,95
700	700	SnCl_4	
750	440	30	0,806
800	300	40	0,725
850	210	50	0,668
PbBr_2		UF_6	
372	10,2	70	0,91
392	8,06	80	0,86
412	6,97	90	0,76
432	6,13		

Таблица 16.17

Кинематическая вязкость ν воды, 10^{-4} м²/сек, при $P = 1$ атм [4]

$t, ^\circ\text{C}$	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60
ν	1,7865	1,5138	1,3037	1,1369	1,0019	0,8909	0,7982	0,6540	0,5477	0,4674

16.8. ВЯЗКОСТЬ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Таблица 16.18

Вязкость η метанола (метилового спирта CH_3O), 10^{-3} кг/(м·сек) [5]

$t, ^\circ\text{C}$	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	20	30	40	50	60	70
η	16	8,8	5,7	4,02	2,98	2,26	1,75	1,39	1,16	0,970	0,817	0,578	0,509	0,446	0,393	0,347	0,306

$t, ^\circ\text{C}$	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240
η	0,271	0,240	0,214	0,190	0,170	0,152	0,136	0,121	0,109	0,098	0,0883	0,0794	0,0716	0,0646	0,0583	0,0528	0,0460

Таблица 16.19

Вязкость η этанола (этилового спирта $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$), 10^{-3} кг/(м·сек) [5]

$t, ^\circ\text{C}$	-98,1	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	5	10
η	44,0	28,5	18,1	12,5	8,7	6,4	4,79	3,65	2,78	2,23	1,773	1,623	1,466

$t, ^\circ\text{C}$	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
η	1,332	1,200	1,096	1,003	0,914	0,834	0,764	0,702	0,644	0,592	0,551	0,504	0,0471

Таблица 16.20

Вязкость η пропанола—I (*н*-пропилового спирта C_3H_8O), 10^{-3} кг/(м·сек) [5]

$t, ^\circ\text{C}$	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	60	80
ν	54,6	31,6	20,2	13,5	9,50	6,90	5,10	3,85	2,89	2,20	1,72	1,38	0,92	0,635
$t, ^\circ\text{C}$	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	
ν	0,535	0,457	0,392	0,337	0,289	0,247	0,211	0,183	0,160	0,143	0,128	0,114	0,102	

Таблица 16.21

Вязкость η пропанола (изопропилового спирта C_3H_8O), 10^{-3} кг/(м·сек) [2]

$t, ^\circ C$	—60	—50	—40	—30	—20	—10	0	10	15	20	30	40	50	60	70	80
η	66,1	37,6	23,2	14,9	10,1	6,8	4,6	3,26	2,86	2,39	1,77	1,33	1,03	0,80	0,65	0,52

Таблица 16.22

Вязкость η *н*-бутанола (бутилового спирта $C_4H_{10}O$), 10^{-3} кг/(м·сек) [5]

$t, ^\circ C$	—50	—40	—30	—20	—10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
η	34,7	22,4	14,6	10,3	7,4	5,19	3,87	2,95	2,28	1,78	1,41	1,14	0,93	0,76	0,63	0,54	0,46

Таблица 16.23

Вязкость η глицерина ($C_3H_8O_3$), 10^{-3} кг/(м·сек) [5]

$t, ^\circ C$	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
η	12100	7050	3950	1480	600	330	180	102	59	35	21	13	5,2	1,8	1,0	0,45	0,22

Вязкость η динилового эфира ($C_4H_{10}O$). 10^{-3} кг/(м·сек) [5]

$t, ^\circ C$	—120	—110	—100	—90	—80	—70	—60	—50	—40	—30
η	4,25	2,54	1,71	1,24	0,97	0,79	0,65	0,55	0,470	0,410

$t, ^\circ C$	—20	—10	0	10	20	30	40	60	80	100
η	0,364	0,328	0,296	0,268	0,243	0,220	0,199	0,166	0,140	0,118

Вязкость η анлиина (C_8H_7). 10^{-3} кг/(м·сек) [5]

$t, ^\circ C$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
η	10,2	6,5	4,40	3,12	2,30	1,80	1,50	1,28	1,10	0,94	0,80	0,69	0,59

Вязкость η нитробензола ($C_6H_5NO_2$). 10^{-3} кг/(м·сек) [5]

$t, ^\circ C$	0	10	20	30	40	50	60	80	100
η	3,09	2,46	2,01	1,69	1,44	1,24	1,09	0,87	0,70

Вязкость η этилацетата ($C_4H_8O_2$). 10^{-3} кг/(м·сек) [5]

$t, ^\circ C$	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	230	240	247
η	0,477	0,380	0,308	0,250	0,212	0,177	0,149	0,125	0,104	0,086	0,068	0,059	0,048	0,036

Вязкость η уксусной кислоты ($C_2H_4O_2$), 10^{-3} кг/(м·сек) [5]

$t, ^\circ C$	30	40	50	60	80	100	120	130
η	0,79	0,69	0,62	0,55	0,453	0,377	0,320	0,297

16.9. ВЯЗКОСТЬ КРЕМНИОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Таблица 16.29

Вязкость η тетракрезидоксисилана $[(CH_3C_6H_4O)_4Si]$, 10^{-5} (кг·сек)/м² [5]

t°, C	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	
η	19680	6080	2890	2290	1630	1030	766	617	505	415	356	300	255	225	200	180	168	
$t,^{\circ}C$	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350
η	154	143	132	212	114	105	97	88	80	74	62	62	59	56	54	51	48	46

Таблица 16.30

Вязкость η силикона (диэтилполисилоксана), 10^{-4} (кг·сек)/м² [5]

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
η	2010	1350	991	750	590	476	395	332	285	246	215	190	169	152	137	124
$t, ^\circ\text{C}$	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	
η	113	104	96	88	82	76	71	66	62	58	55	52	49	46	44	

Таблица 16.31

16.10. ВЯЗКОСТЬ УГЛЕВОДОРОДОВ

Вязкость η циклических углеводородов, 10^{-3} кг/(м·сек) [2,5]

Формула	Название	Температура, $^\circ C$											
		-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	80	100	110
C_5H_{10}	Циклопентан	0,72	0,631	0,555	0,491	0,439	0,393	0,354	0,323	—	—	—	—
C_6H_{12}	Метилциклопентан	0,86	0,745	0,648	0,569	0,505	0,450	0,404	0,365	0,330	—	—	—
C_6H_{12}	Циклогексан	—	—	—	1,180	0,979	0,826	0,704	0,608	0,531	0,411	—	—
C_7H_{14}	Этилциклопентан	0,96	0,829	0,725	0,637	0,565	0,506	0,456	0,412	0,376	0,32	0,27	—
C_7H_{14}	Метилциклогексан	1,41	1,175	0,991	0,847	0,731	0,639	0,562	0,500	0,446	0,36	0,30	—
C_8H_{16}	Пропилциклопентан	1,24	1,049	0,886	0,772	0,679	0,603	0,538	0,488	0,444	0,38	0,33	0,30
C_8H_{16}	Этилциклогексан	1,63	1,356	1,142	0,976	0,843	0,737	0,651	0,581	0,523	0,43	0,37	0,34
$C_{21}H_{42}$	Гексадецилциклогексан	—	—	—	—	9,63	7,28	5,56	4,43	3,55	2,45	1,84	1,58
$C_{21}H_{42}$	Пентадецилциклогексан	—	—	—	—	—	8,91	6,69	5,21	4,15	2,74	1,87	1,57

Вязкость η ароматических углеводородов, 10^{-3} кг/(м·сек) [2,5]

Формула	Название	Температура, °C											
		-20	-10	0	10	20	30	40	60	80	100	120	150
C_6H_6	Бензол	—	—	—	0,755	0,649	0,559	0,489	0,389	0,318	0,261*	0,220*	0,169*
C_7H_8	Толуол	0,989	0,863	0,770	0,667	0,584	0,517	0,469	0,381	0,318	0,269	—	—
C_8H_{10}	Этилбензол	1,170	1,021	0,873	0,757	0,671	0,596	0,530	0,436	0,363	0,368	0,265	—
C_8H_{10}	o-Ксилол	1,447	1,232	1,055	0,917	0,804	0,707	0,623	0,500	0,417	0,345	0,294	—
C_8H_{10}	m-Ксилол	—	—	0,805	0,699	0,615	0,548	0,490	0,405	0,340	0,290	0,250	—
C_8H_{10}	p-Ксилол	—	—	—	—	0,648	0,571	0,514	0,416	0,354	0,293	0,250	—
$C_{12}H_{18}$	Гексилбензол	5,17	3,66	2,60	1,98	1,63	1,362	1,162	0,909	0,712	0,574	0,47	0,36
$C_{16}H_{26}$	Децилбензол	16,0	9,81	6,72	4,94	3,80	3,02	2,46	1,730	1,275	0,977	0,77	0,56
$C_{20}H_{34}$	Тетрадецилбензол	—	—	—	10,63	7,65	5,66	4,43	2,90	2,06	1,507	1,14	0,79

* При давлении насыщенного пара выше точки кипения.

Таблица 16.33

Вязкость η предельных углеводородов, 10^{-3} кг/(м·сек) [1]

Формула	Название	Температура, °C													
		-90	-50	-20	0	10	20	40	60	80	100	150	200	250	300
C_4H_{10}	Бутан	0,63	0,355	0,252	0,207*	0,191*	0,174*	0,140*	—	—	—	—	—	—	—
C_4H_{10}	Изобутан	—	0,392	0,267	0,214*	0,195*	0,176*	0,146*	—	—	—	—	—	—	—
C_5H_{12}	Пентан	0,448	0,474	0,341	0,283	0,259	0,240	—	—	—	—	—	—	—	—
C_5H_{12}	Изопентан (2-метил-бутан)	—	0,55	0,352	0,277	0,248	0,224	—	—	—	—	—	—	—	—
C_5H_{12}	Неопентан (2,2-диметилпропан)	—	—	—	0,327	0,280*	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C_6H_{14}	Гексан	1,82	0,742	0,479	0,381	0,343	0,307	0,253	0,222	—	—	—	—	—	—
C_6H_{14}	Изогексан (2-метил-пентан)	—	—	—	0,370	0,331	0,298	0,246	0,206	—	—	—	—	—	—
C_7H_{16}	Гептан	3,85	1,18	0,689	0,526	0,466	0,417	0,339	0,283	0,241	0,209*	—	—	—	—
C_7H_{16}	Изогептан (2-метил-гексан)	—	—	—	0,476	0,424	0,379	0,309	0,257	0,216	—	—	—	—	—
C_8H_{18}	Октан	—	1,83	0,967	0,714	0,622	0,546	0,435	0,356	0,298	0,255	0,220	—	—	—
C_9H_{20}	Нонан	—	2,99	1,40	0,968	0,827	0,714	0,555	0,445	0,366	0,308	0,264	0,213	—	—
$C_{10}H_{22}$	Декан	—	—	1,93	1,27	1,07	0,907	0,701	0,552	0,448	0,372	0,314	0,249	—	—
$C_{11}H_{24}$	Ундекан	—	—	2,779	1,742	1,425	1,182	0,871	0,671	0,535	0,437	0,365	0,288	—	—
$C_{12}H_{26}$	Додекан	—	—	—	2,264	1,827	1,492	1,064	0,803	0,632	0,510	0,334	0,231	—	—
$C_{13}H_{28}$	Тридекан	—	—	—	2,962	2,339	1,878	1,312	0,969	0,751	0,598	0,380	0,262	—	—
$C_{14}H_{30}$	Тетрадекан	—	—	—	—	2,96	2,322	1,560	1,135	0,868	0,685	0,431	0,294	0,207	—
$C_{15}H_{32}$	Пентадекан	—	—	—	—	3,663	2,841	1,873	1,355	1,010	0,786	0,483	0,326	0,231	—
$C_{16}H_{34}$	Гексадекан	—	—	—	—	—	3,451	2,232	1,560	1,161	0,892	0,532	0,349	0,242	—
$C_{17}H_{36}$	Гептадекан	—	—	—	—	—	4,209	2,652	1,829	1,340	1,014	0,598	0,392	0,277	0,203
$C_{18}H_{38}$	Октадекан	—	—	—	—	—	—	3,060	2,060	1,484	0,952	—	—	—	—
$C_{19}H_{40}$	Нонадекан	—	—	—	—	—	—	3,588	2,379	1,693	1,719	0,719	0,468	0,327	0,24
$C_{20}H_{42}$	Эйкозан	—	—	—	—	—	—	4,072	2,665	1,880	1,403	1,094	0,505	0,353	0,26

* При давлении насыщенного пара выше нормальной точки кипения.

16.11. ВЯЗКОСТЬ НУКЛИДОВ И ИХ СОЕДИНЕНИЙ

Таблица 16.34

Вязкость η нуклидов и их соединений, 10^{-7} кг/(м·сек)

$^{10}\text{BF}_3$	$t, ^\circ\text{C}$	20	0	—20	—40	—60	—80	—100											
	η	165,40	155,35	144,80	134,15	123,15	112,00	101,45											
$^{11}\text{BF}_3$	$t, ^\circ\text{C}$	20	0	—20	—40	—60	—80	—100											
	η	166,60	156,50	145,85	135,10	124,00	112,70	102,05											
$^{14}\text{NH}_3$	$t, ^\circ\text{C}$	20	0	—20	—40	—60													
	η	98,50	91,85	84,60	77,60	70,72													
$^{15}\text{NH}_3$	$t, ^\circ\text{C}$	20	0	—20	—40	—60													
	η	100,75	93,95	86,50	79,35	72,30													
$^{14}\text{N}^{16}\text{O}$	$t, ^\circ\text{C}$	20	0	—20	—40	—60	—80	—100	—120	—140	—160								
	η	189,90	179,25	168,10	156,70	144,80	132,40	119,66	106,40	93,00	78,80								
$^{15}\text{N}^{16}\text{O}$	$t, ^\circ\text{C}$	20	0	—20	—40	—60	—80	—100	—120	—140	—160								
	η	192,85	182,25	170,70	159,10	147,10	134,45	121,50	108,09	94,45	80,00								
^{20}Ne	$t, ^\circ\text{C}$	21,6	18,9	—10,3	—50,5	—80,8	—90,2	—102,3	—110,3	—122,2	—130,2	—155,0	—156,6	—156,8	—161,5	—174,3	—179,0	—195,8	
	η	311,7	309,6	288,7	258,0	233,3	225,8	215,6	208,5	206,8	190,3	166,2	164,8	164,5	159,6	145,3	140,1	120,3	
^{22}Ne	$t, ^\circ\text{C}$	23,3	19,0	20,0	17,5	—20,3	—33,3	—38,2	—75,2	—100,6	—119,0	—146,7	—150,0	—154,2	—156,0	—160,0	—177,3	—181,5	—195,8
	η	327,8	324,4	325,2	323,5	294,2	283,6	280,1	249,4	227,6	210,3	182,4	178,7	174,8	173,0	168,2	148,4	143,6	125,0
$^{15}\text{N}_2$	$t, ^\circ\text{K}$	293,3	292,7	292,0	291,2	291,0	291,0	272,5	205,5	199,2	199,0	198,1	150,0	124,5	82,2	79,3	79,2	77,5	
	η	179,9	179,3	179,0	178,3	178,1	178,2	154,7	134,8	131,5	131,5	130,7	103,1	87,3	58,9	57,0	56,8	55,6	
$^{14}\text{N}_2$	$t, ^\circ\text{K}$	297,4	292,7	289,0	285,0	234,2	211,0	203,7	168,8	116,0	80,6	77,5							
	η	177,3	175,5	173,7	171,8	147,8	135,5	131,4	112,1	80,2	56,7	54,6							
^3He	$t, ^\circ\text{C}$	22,1	21,6	18,0	17,6	—20,0	—53,5	—58,0	—68,0	—93,4	—121,7	—123,7	—147,5	—159,4	—160,0	—174,6	—179,1	—195,8	
	η	171,6	171,2	170,0	169,8	154,4	140,5	138,8	134,2	123,3	110,6	109,7	98,0	91,8	91,7	83,6	81,2	71,7	
D_2	$t, ^\circ\text{C}$	25,9	24,1	20,0	—28,1	—44,1	—73,0	—107,1	—154,3	—183,0	—195,8								
	η	125,2	124,7	123,6	109,8	104,8	95,8	83,3	66,1	54,1	48,3								
H_2	$t, ^\circ\text{C}$	26,5	24,3	20,0	—35,6	—73,1	—96,9	—118,5	—139,6	—162,1	—183,0	—195,8							
	η	90,2	89,7	88,8	77,0	68,4	62,7	57,4	51,8	45,3	39,1	35,2							

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубев И. Ф. Вязкость газов и газовых смесей. М., Физматгиз, 1959.
2. Справочник химика. М.—Л., «Химия», 1966.
3. Кэй Д., Лэби Т. Справочник физика-экспериментатора. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1949.
4. Кэй Д., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. Пер. с англ. Под ред. К. П. Яковлева. М., Физматгиз., 1962.
5. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963.

6. Менабде Н. Е. Коэффициенты вязкости изотопов водорода (H_2 , D_2), неона (Ne^{20} , Ne^{22}) и гелия (He^3) в температурном интервале от -195 до $+25^\circ C$. — «Атомная энергия», 1965, т. 19, № 5, с. 453.
7. Менабде Н. Е. Влияние изотопного замещения на вязкость газов. — «Атомная энергия», 1968, т. 25, № 1, с. 42.
8. Менабде Н. Е. Коэффициент вязкости $N_2^{14} - N_2^{15}$ в интервале температур $78-300^\circ C$. — «Атомная энергия», 1964, т. 17, № 4, с. 307.

ГЛАВА 17

ДИФфуЗИЯ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

Диффузия — процесс выравнивания концентрации частиц атомов, молекул, ионов, электронов в среде. При наличии градиента концентрации n частиц в веществе возникает поток этих частиц j , выравнивающий их концентрации. Поток связан с коэффициентом диффузии D посредством закона Фика:

$$j = -D \text{grad } n. \quad (17.1)$$

Это соотношение справедливо, когда размеры системы в направлении градиента много больше длины свободного пробега частиц в среде, а изменение концентрации на расстоянии длины свободного пробега много меньше характерного значения концентрации частиц n . Кроме того, предполагается отсутствие внешних полей, градиентов температуры и давления.

17.1. ДИФфуЗИЯ В ГАЗАХ

Диффузия частиц в газах определяется парными соударениями пробной частицы с атомами или молекулами газа. Поэтому вплоть до очень высоких давлений* коэффициент диффузии обратно пропорционален плотности частиц газа и выражается через характеристический парного соударения пробной частицы и частицы газа — диффузионное сечение рассеяния σ^* .

Согласно элементарной кинетической теории газов, выражение для коэффициента диффузии малой примеси в газе, состоящем из одного сорта частиц, а также для коэффициента самодиффузии имеет вид

$$D = \langle v \rangle \lambda / 3, \quad (17.2)$$

где $\langle v \rangle$ — средняя относительная скорость соударения частиц примеси и частиц газа, $\langle v \rangle \approx \sqrt{2T/\mu}$; T — температура газа; μ — приведенная масса сталкивающихся частиц; $\lambda = 1/n\sigma^*$ — длина пробега пробных частиц в газе; n — плотность числа частиц газа. Соотно-

* Область давлений, где указанная зависимость выполняется с достаточной точностью (погрешность 2—5%), зависит от температуры. Вблизи критического давления точность существенно падает.

шение (17.2) является точным, если σ^* не зависит от скорости сталкивающихся частиц. В противном случае понятие длины пробега теряет определенность, и указанное соотношение справедливо для эффективных величин. Принято приводить значение коэффициента диффузии не при постоянной плотности частиц, а при постоянном давлении. В этом случае, учитывая уравнение газового состояния $P = nkT$, получаем зависимость $D = D_0(T/273)^{1.5}$, где D_0 — коэффициент диффузии при нормальных условиях. Это соотношение справедливо при тех же условиях, что и соотношение (17.2).

Коэффициент самодиффузии газов

В табл. 17.1 представлены значения коэффициентов самодиффузии D_0 некоторых газов при нормальных условиях ($T = 273^\circ K$, $P = 1 \text{ атм}$). Дан интервал температур, для которого температурную зависимость коэффициента самодиффузии можно аппроксимировать степенной функцией

$$D(T) = D_0 (T/273)^a; \quad (17.3)$$

приведены значения показателя a .

Таблица 17.1
Параметры зависимости (17.3) [1.2]

Газ	D_0 см ² /сек	a	Температурный интервал, °K	Газ	D_0 см ² /сек
He	1,62	1,71	14—296	H ₂	1,28
Ne	0,452	—	—	CO	0,175
Ar	0,156	1,92	77—353	HCl	0,125
Kr	0,08	—	—	HBr	0,079
Xe	0,048	—	—		
N ₂	0,17	1,9	77—353	CO ₂	0,097
O ₂	0,18	1,92	77—353	CH ₄	0,206
UF ₆	0,0165	1,6	144—296	H ₂ O (пары)	0,277

Коэффициенты самодиффузии газов при высоких температурах, $\text{см}^2/\text{сек}$, при $P = 1 \text{ атм}$ [1].
Данные получены теоретически, с использованием потенциала межатомного взаимодействия, восстановленного из экспериментов по рассеянию атомных пучков

Газ	Температура, 10 ³ °K																				
	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	8	9	10	11	12	13	14	15
He	13,3	26,9	46,7	70,3	98,6	130	167	207	250	299	350	407	467	595	738	898	1070	1260	1460	1670	1890
Ne	3,93	7,76	12,7	18,5	25,2	32,6	41,1	50,4	60,7	72,0	83,8	96,5	110	139	172	207	244	284	325	368	414
Ar	1,51	300	5,03	7,50	10,4	13,9	17,8	22,1	26,8	31,9	37,4	43,3	49,5	62,8	77,4	93,2	111	129	148	169	190
Kr	0,853	1,72	2,83	4,14	5,67	7,38	9,32	11,4	13,8	16,4	19,2	22,2	25,5	32,6	40,7	49,6	59,6	70,2	81,5	93,7	107
Xe	0,502	1,01	1,65	2,43	3,32	4,32	5,42	6,64	7,97	9,43	10,9	12,6	14,4	18,2	22,5	27,2	32,4	37,7	43,4	49,4	55,7
N ₂	1,56	3,08	5,05	7,48	10,4	13,8	17,6	21,9	26,6	31,8	37,3	43,2	49,6	61,5	78,9	95,5	113	113	153	174	197

Коэффициенты взаимной диффузии в газах

В двухкомпонентной смеси при отсутствии внешних полей, химических реакций, а также градиентов температуры и давления потоки j_1 и j_2 частиц первого и второго сортов выражаются соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} j_1 &= -nD_{12} \text{grad } x_1; \\ j_2 &= -nD_{21} \text{grad } x_2, \end{aligned} \right\} \quad (17.4)$$

где n — полная плотность числа частиц; x_1 и x_2 — мольные доли частиц первого и второго сортов. Эти уравнения справедливы в системе отсчета, в которой газ как целое покоится ($j_1 + j_2 = 0$). Поскольку, кроме этого, $x_1 + x_2 = 1$, то $D_{12} = D_{21}$.

Коэффициент диффузии D_{AB} частиц произвольного сорта в смеси двух газов A и B определяется соотноше-

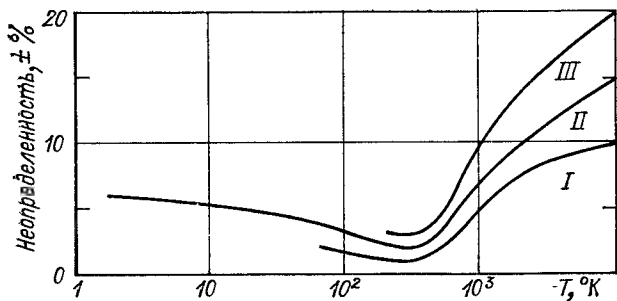


Рис. 17.1. Неопределенность данных, представленных в табл. 17.3, в зависимости от температуры.

Неопределенность значения коэффициента диффузии, %, для систем трех групп

Группа	Система	Температура, °K					
		1,75	65	300	500	10 ³	10 ⁴
I	He—Ne, —Ar, —Kr, Xe; Ne—Ar, —Kr, Xe; Ar—Kr, Ar—Xe;	—	2	1	2	5	10
II	Kr—Xe; H ₂ —N ₂ ³ He— ⁴ He; He—H ₂ , —N ₂ , —CO, —O ₂ , —воздух, —CO ₂ ;						
III	H ₂ —Ne, —Ar, —Kr, —D ₂ , CO, —воздух, —CO ₂ ; N ₂ —Ar, —CO, —CO ₂ Ar—CH ₄ , —CO, —CO ₂ , —воздух, SF ₆ ; H ₂ —Xe, —CH ₄ ; —O ₂ , —SF ₆ ; CH ₄ —He, —N ₂ , —O ₂ , —воздух, SF ₆ ; N ₂ —Ne, —Kr, —Xe, —CH ₄ , O ₂ , SF ₆ ; CO—Kr, —O ₂ , —воздух, CO ₂ , SF ₆ ; O ₂ —Ar, —CO ₂ , —SF ₆ ; CO ₂ —воздух, —N ₂ O, —SF ₆ ; SF ₆ —He, —воздух	6	4	2	3	7	15
		—	—	3	4	10	20

Таблица 17.4

Неопределенность значений коэффициента взаимной диффузии для систем IV группы

Система	Интервал температур, °K	Неопределенность, %
H ₂ O—N ₂	282—373	±4
H ₂ O—O ₂	282—1070	±7
H ₂ O—воздух	282—1070	±5—10
H ₂ O—CO ₂	296—1640	±7—10
CO ₂ —Ne	195—625	±3—5
CO ₂ —C ₃ H ₈	298—550	±3—5
H—H ₂	~300 >1000	±5 ±30
H—N ₂ ; O—N ₂ ; O—O ₂	~300 >1000	±10 ±25
H—He; H—Ar; O—He; O—Ar	~300 >1000	±15 ±30

нием (закон Бланка), справедливым с погрешностью до нескольких процентов:

$$1/D_{AB} = x_A/D_{1A} + x_B/D_{1B},$$

где D_{1A} и D_{1B} — коэффициенты взаимной диффузии пробной частицы в газах A и B при давлениях, равных суммарному давлению в рассматриваемой смеси.

Точность, с которой известны коэффициенты взаимной диффузии газов, существенно зависит от интервала температур, где измеряются эти коэффициенты, а также от сорта исследуемого газа. Представленные результаты измерений коэффициента взаимной диффузии различных пар газов разделены на четыре группы (табл. 17.3 и 17.4). Погрешность, с которой известны коэффициенты взаимной диффузии газов первых трех групп, видна из рис. 17.1, а для четвертой группы соответствующие сведения приведены в табл. 17.4.

В табл. 17.5 и 17.6 представлены параметры, входящие в эмпирические выражения для температурной зави-

симости коэффициентов взаимной диффузии [2]. Для систем, представленных в табл. 17.5, эта зависимость имеет вид

$$D = D_0 (T/273)^a \exp \left(-\frac{S}{T} - \frac{S'}{T^2} \right), \quad (17.5)$$

где S , S' — эмпирические параметры, а экспоненциальный множитель может быть опущен без потери точности для температур выше 200°K.

Для систем, представленных в табл. 17.6, эмпирическая зависимость имеет вид

$$D = D_0 (T/273)^a \exp (-S/T), \quad (17.6)$$

причем при $T > 20S$ экспоненциальный множитель можно заменить единицей.

Таблица 17.5

Параметры выражения (17.5), действительные в температурном интервале $T_1 - 10^4$ °K

Система	D_0 , см ² /сек	a	S , °K	S' , °K	T_1 , °K	Группа
³ He— ⁴ He	1,55	1,501	—0,9630	1,894	1,74	II
He—Ne	0,235	1,509	1,87	—	65	I
He—Ar	0,635	1,552	1,71	—	77	I
He—Kr	0,503	1,609	—32,65	2036	77	I
He—Xe	0,391	1,644	—68,87	5416	169	I
He—H ₂	1,32	1,510	—	—	90	II
He—N ₂	0,613	1,524	—	—	77	II
He—CO	0,613	1,524	—	—	77	II
Ne—Ar	0,278	1,546	1,82	1170	90	I
Ne—Kr	0,242	1,555	20,4	—	112	I
Ne—Xe	0,197	1,584	10,1	—	169	I
Ar—Kr	0,14	1,556	47,3	—	169	I
Ar—Xe	0,122	1,563	59,9	—	169	I
Ar—N ₂	0,79	1,519	39,8	—	242	II
Kr—Xe	0,0812	1,608	52,7	—	169	I
Kr—H ₂	0,664	1,564	26,4	—	77	II
H ₂ —D ₂	0,99	1,500	6,072	38,10	14	II
H ₂ —N ₂	0,66	1,548	—2,80	1067	65	I
H ₂ —CO	0,66	1,548	—2,80	1077	65	II
N ₂ —CO	0,175	1,576	36,2	3825	78	II

Параметры эмпирической зависимости (17.6)

Система	D_0 , см ² /сек	a	S , °K	Температур- ный интервал °K	Группа
He—CH ₄	0,57	1,750	—	298—10 ⁴	III
He—O ₂	0,45	1,710	—	244—10 ⁴	II
He—воздух	0,62	1,729	—	244—10 ⁴	II
He—CO ₂	0,52	1,720	—	200—530	II
He—SF ₆	0,35	1,627	—	290—10 ⁴	III
Ne—H ₂	0,99	1,731	—	90—10 ⁴	II
Ne—N ₂	0,28	1,743	—	293—10 ⁴	III
Ne—CO	0,22	1,776	—	195—625	—
Ar—CH ₄	0,172	1,785	—	307—10 ⁴	III
Ar—N ₂	0,17	1,752	—	244—10 ⁴	II
Ar—CO	0,17	1,752	—	244—10 ⁴	III
Ar—O ₂	0,167	1,736	—	243—10 ⁴	III
Ar—воздух	0,165	1,749	—	244—10 ⁴	III
Ar—CO ₂	0,177	1,646	89,1	276—1800	III
Ar—SF ₆	0,114	1,596	145,4	328—10 ⁴	III
Kr—N ₂	0,13	1,766	—	248—10 ⁴	III
Kr—CO	0,13	1,766	—	248—10 ⁴	III
Xe—H ₂	0,54	1,712	16,9	242—10 ⁴	III
Xe—N ₂	0,106	1,789	—	242—10 ⁴	III
H ₂ —CH ₄	0,62	1,765	—	293—10 ⁴	III
H ₂ —O ₂	0,69	1,732	—	252—10 ⁴	III
H ₂ —воздух	0,66	1,750	—	252—10 ⁴	II
H ₂ —CO ₂	0,56	1,750	11,7	200—550	II
H ₂ —SF ₆	0,52	1,570	102,5	298—10 ⁴	III
CH ₄ —N ₂	0,2	1,750	—	298—10 ⁴	III
CH ₄ —O ₂	0,22	1,695	44,2	294—10 ⁴	III
CH ₄ —воздух	0,186	1,747	—	298—10 ⁴	III
CH ₄ —SF ₆	0,119	1,657	69,2	298—10 ⁴	III
N ₂ —O ₂	0,182	1,724	—	285—10 ⁴	III
N ₂ —H ₂ O	0,204	2,072	—	282—373	IV
N ₂ —CO ₂	0,208	1,570	113,6	288—1800	II
N ₂ —SF ₆	0,122	1,590	119,4	328—10 ⁴	III
CO—O ₂	0,175	1,724	—	285—10 ⁴	III
CO—воздух	0,182	1,730	—	285—10 ⁴	III
CO—CO ₂	0,142	1,803	—	282—473	III
CO—SF ₆	0,129	1,584	139,4	297—10 ⁴	III
O ₂ —H ₂ O	0,207	2,072	—	282—450	IV
	0,264	1,632	—	450—1070	IV
O ₂ —CO ₂	0,174	1,661	61,3	287—1083	III
O ₂ —SF ₆	0,138	1,522	129,0	297—10 ⁴	III

Система	D_0 , см ² /сек	a	S , °K	Температур- ный интервал, °K	Группа
Воздух—H ₂ O	0,205	2,072	—	282—450	IV
Воздух—H ₂ O	0,26	1,632	—	450—1070	IV
Воздух—CO ₂	0,207	1,590	102,1	280—1800	IV
Воздух—SF ₆	0,126	1,576	121,1	328—10 ⁴	IV
H ₂ O—CO ₂	0,41	1,500	307,9	296—1640	IV
CO ₂ —N ₂ O	0,095	1,866	—	195—550	III
CO ₂ —C ₂ H ₄	0,074	1,896	—	298—550	IV
CO ₂ —SF ₆	0,069	1,886	—	328—472	III
H—He	2,35	1,732	—	275—10 ⁴	IV
H—Ar	0,112	1,597	—	275—10 ⁴	IV
H—H ₂	0,184	1,728	—	190—10 ⁴	IV
N—N ₂	0,29	1,774	—	280—10 ⁴	IV
O—He	0,84	1,749	—	280—10 ⁴	IV
O—Ar	0,23	1,841	—	280—10 ⁴	IV
O—N ₂	0,28	1,774	—	280—10 ⁴	IV
O—O ₂	0,28	1,774	—	280—10 ⁴	IV

Таблица 17.7

Коэффициент диффузии метастабильных атомов
инертных газов в собственном газе при давлении
1 мм рт. ст., см²/сек [3]*

Атом	Температура, °K					
	20	40	77	150	300	500
He (² S)	60	100	160	260	460	710
He (² 1S)	45	75	120	210	370	570
Ne (³ P ₂)	19	33	56	—	—	—
Ar (³ P ₂)	8	13	20	34	64	—
Kr (³ P ₂)	—	12	12	20	38	51
Xe (³ P ₂)	3	5	8	13	22	33

* Погрешность данных не превышает ± 5—10%.

Диффузия заряженных частиц в газе.

Амбиполярная диффузия

В слабоионизованной плазме, где степень ионизации $n_e/n_a \ll (T_e/Ry)$ (n_e , n_a — плотность электронов и нейтральных частиц соответственно; T_e — температура электронов; $Ry = 13,6$ эв — атомный масштаб энергии), диффузия заряженных частиц (электронов и ионов) определяется в основном парными соударениями этих частиц с нейтральными частицами (атомами и молекулами). При этом в случае максвелловского распределения заряженных частиц по скоростям коэффициент диффузии электронов (ионов) связан с их подвижностью K , а соответственно и с электропроводностью плазмы σ , соотношением Эйнштейна*:

$$D = \frac{KkT}{e} = \frac{kT\sigma}{e^2 n_e} \quad (17.7)$$

* Когда распределение заряженных частиц по энергиям отличается от максвелловского, соотношение (17.7) выполняется приближенно с погрешностью 10—15%.

(k — постоянная Больцмана; T — температура плазмы; e — заряд электрона), которое позволяет определить коэффициент диффузии электронов на основании данных по электропроводности слабоионизованной плазмы.

Если характерный размер, на котором заметно изменяется плотность заряженных частиц в плазме, много больше радиуса Дебая

$$r_D = \sqrt{\frac{kT_e}{8\pi n_e e^2}},$$

плазма является квазинейтральной, т. е. плотности положительных и отрицательных зарядов равны. При этом имеет место амбиполярная диффузия с коэффициентом диффузии D_a , единым для электронов и ионов и выражающимся через коэффициент диффузии ионов в том же газе D_i :

$$D_a = D_i (1 + T_e/T_i). \quad (17.8)$$

Коэффициент диффузии ионов, $\text{см}^2/\text{сек}$, в чужом газе при нормальных условиях ($P = 1 \text{ атм.}$ $T = 273^\circ\text{К}$)

Ион	Основной газ									
	He	Ne	Ar	Kr	Xe	H ₂	N ₂	O ₂	CO	CO ₂
Li ⁺	0,45	0,22	0,103	0,081	0,062	0,29	0,103	0,108	0,098	0,082
Na ⁺	0,38	0,15	0,066	0,049	0,036	0,26	0,069	0,071	0,066	0,052
K ⁺	0,37	0,14	0,056	0,040	0,030	0,26	0,061	0,062	0,058	0,074
Rb ⁺	0,37	0,12	0,048	0,031	0,022	0,26	0,053	0,054	0,05	0,037
Cs ⁺	0,36	0,12	0,045	0,029	0,020	0,25	0,051	0,052	0,053	0,035
NO ⁺	0,38	0,15	0,061	0,046	0,033	0,26	0,065	0,067	0,062	0,048
O ₂ ⁺	0,38	0,15	0,060	0,045	0,032	0,26	0,063	—	0,060	0,048
N ₂ ⁺	0,38	0,15	0,059	0,047	0,034	0,26	—	0,067	0,063	0,049
Ne ⁺	0,39	—	0,069	0,052	0,039	0,27	0,073	0,074	0,070	0,054
Ar ⁺	0,37	0,14	—	0,040	0,030	0,26	0,061	0,062	0,058	0,044
Kr ⁺	0,37	0,12	0,048	—	0,022	0,26	0,053	0,054	0,05	0,037
Xe ⁺	0,36	0,12	0,045	0,029	—	0,25	0,051	0,052	0,023	0,035
He ₂ ⁺	0,44	0,21	0,098	0,076	0,059	0,28	0,098	0,103	0,094	0,078
Ne ₂ ⁺	0,37	0,14	0,056	0,040	0,030	0,26	0,061	0,062	0,058	0,044
Ar ₂ ⁺	0,37	0,12	0,049	0,031	0,023	0,26	0,054	0,054	0,051	0,038
Xe ₂ ⁺	0,36	0,12	0,043	0,026	0,017	0,25	0,049	0,048	0,046	0,033
F ₂ ⁺	0,37	0,14	0,056	0,040	0,031	0,26	0,062	0,062	0,058	0,045

Здесь T_i и T_e — температура ионов и электронов соответственно. Соотношение (17.8) справедливо с той же точностью, с какой выполняется соотношение Эйнштейна (17.7).

Коэффициент диффузии ионов в чужом газе с хорошей точностью (погрешность 10—15%) может быть выражен через поляризуемость β основного газа и приведенную массу иона и молекулы основного газа [4]:

$\mu = \frac{M_i M_g}{M_i + M_g}$ (M_i — масса иона; M_g — масса молекулы основного газа):

$$D_i = \frac{0,0031}{\sqrt{\mu\beta}} T_i, \quad (17.9)$$

где T_i — температура ионов, $^\circ\text{К}$; β — поляризуемость в атомных единицах (атомная единица поляризуемости эквивалентна $1,5 \cdot 10^{-25} \text{ см}^3$), а μ — а.е.м.

В табл. 17.8 представлены значения коэффициента диффузии различных ионов в некоторых газах при $T_i = 273^\circ\text{К}$ и $P = 1 \text{ атм}$ [4]. Коэффициент диффузии ионов в собственном газе выражается с неопределенностью 5—10% через сечение резонансной перезарядки иона на атоме, когда температуры ионов и атомов близки [4]:

$$D = \frac{0,341 \sqrt{T/M}}{n\sigma_{\text{рез}}^* (2,24\sqrt{2T/M})}, \quad (17.10)$$

где T — температура газа, $^\circ\text{К}$; M — масса атомов (ионов), г; $\sigma_{\text{рез}}^*$ ($2,24\sqrt{2T/M}$) — сечение резонансной перезарядки иона на атоме при скорости соударения $2,24\sqrt{2T/M}$, см^2 ; n — плотность числа частиц газа, см^{-3} .

В табл. 17.9 представлены значения коэффициента диффузии некоторых ионов в собственном газе, вычисленные на основании выражения (17.10).

Таблица 17.9

Коэффициент диффузии ионов в собственном газе, $\text{см}^2/\text{сек}$ ($n = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) [4]

$T, ^\circ\text{К}$	He ⁺	Ne ⁺	Ar ⁺	Kr ⁺	Xe ⁺	Hg ⁺	Rb ⁺	Cs ⁺
77	0,086	0,041	0,013	—	—	—	—	—
195	0,194	0,077	0,0303	—	—	—	—	—
300	0,26	0,109	0,041	0,022	0,016	—	—	—
350	—	—	—	—	—	0,0078	—	—
630	—	—	—	—	—	—	0,0069	0,005
1400	—	—	—	—	—	—	—	0,0077

17.2. ДИФфузия в жидкостях

Диффузия в жидкостях обусловлена процессами многочастичного взаимодействия пробной частицы с частицами жидкости. Поэтому теоретическое определение коэффициентов диффузии в жидкостях весьма затруднено, и единственным источником надежной информации является эксперимент. Исключение составляет диффузия больших молекул в растворителе с низкой молекулярной массой, которая описывается формулой Эйнштейна—Стокса:

$$D_{12} = kT/(6\pi\eta r), \quad (17.11)$$

где r — радиус большой молекулы, форма которой аппроксимируется сферой; ν — динамическая вязкость жидкости. В уравнении (17.11), справедливом для многих систем, величина r остается неопределенным параметром, который известен с точностью до множителя 2.

Коэффициенты диффузии для многих веществ в различных растворителях хорошо аппроксимируются эмпирической формулой [5]*

$$D_{12} = K_1 K_2, \quad (17.12)$$

где K_1 — коэффициент, не зависящий от свойств растворителя, а K_2 — коэффициент, не зависящий от свойств растворенного вещества. Коэффициенты K_1 и K_2 зависят от температуры, однако если известно значение D_{12} при температуре T_1 , можно определить $D_{12}(T_2)$ из соотношения

$$D_{12}(T_2) = D_{12}(T_1) \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{\nu_2(T_1)}{\nu_2(T_2)}, \quad (17.13)$$

где $\nu_2(T_2)$, $\nu_2(T_1)$ — динамическая вязкость растворителя при температурах T_2 и T_1 . В табл. 17.10 представлены значения K_1 для некоторых растворенных веществ, а в табл. 17.11 — K_2 для некоторых растворителей.

Таблица 17.10

Значения K_1 для различных растворенных веществ [5]

Растворенное вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$K_1, 10^{-3}$ (см ² /сек) ^{1/2}	Растворенное вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$K_1, 10^{-3}$ (см ² /сек) ^{1/2}
Аллиловый спирт	15	2,328	Пиридин	20	2,723
Анилин	15	2,178	Пропиловый спирт	15	2,243
Ацетон	15	3,546			
Бензальдегид	15	2,364	Пропионовая кислота	15	3,008
Бензол	25	3,460	Тетрахлорметан	25	3,578
Бромбензол	15	2,403	Трихлорметан	15	3,328
Бромэтан	15	4,025	Толуол	25	3,037
Бутиловый спирт	15	2,049	Уксусная кислота	25	2,312
Вода	25	2,591	Фенол	5	1,889
1,2-Дибромэтан	15	2,913	Фурфурол	15	2,178
Диэтиловый эфир	15	3,833	Хлоральгидрат	15	2,033
Изоамиловый спирт	15	2,282	Хлорбензол	15	2,591
Иодметан	7,5	3,912	Этиловый спирт	15	2,456
Метиловый спирт	15	2,861			
Муравьиная кислота	6	4,159			
Нитробензол	15	2,322			

* Везде ниже, если это не оговорено особо, речь идет о диффузии вещества, концентрация которого в растворе мала.

Таблица 17.11

Значение K_2 для различных растворителей [5]

Растворитель	$t, ^\circ\text{C}$	$K_2, 10^{-3}$ (см ² /сек) ^{1/2}	Растворитель	$t, ^\circ\text{C}$	$K_2, 10^{-3}$ (см ² /сек) ^{1/2}
Бензол	15	5,925	Тетрахлорметан	25	4,239
Бромбензол	25	5,094	Толуол	25	6,109
Вода	25	4,151	Хлорбензол	25	5,676
Метиловый спирт	15	6,745	Этиловый спирт	25	3,831

Для сильно разбавленных растворов электролитов коэффициент диффузии

$$D_{12} = \frac{2RT}{[1/\lambda_+ + 1/\lambda_-] Fa^2}, \quad (17.14)$$

где $R = 8,316$ Дж/(град·моль) — газовая постоянная; T — температура, °К; λ_+ , λ_- — проводимость отрицательных и положительных ионов в пределе нулевых концентраций, а·г-эв/(см²·в); $Fa = 9650$ к/г-эв — число Фарадея. Предельные значения проводимостей λ_+^0 и λ_-^0 в воде при $t = 25^\circ\text{C}$ представлены в табл. 17.12. В этом случае выражение (17.14) имеет вид

$$D_{12} = \frac{0,536 \cdot 10^{-6}}{1/\lambda_+ + 1/\lambda_-} \text{ см}^2/\text{сек}.$$

Значения коэффициентов диффузии некоторых веществ, растворенных в воде, приведены в табл. 17.13 и 17.14.

Таблица 17.12

Предельные значения ионной проводимости в воде при 25°C, а·г-эв/(см²·в) [5]

Катион	λ_+^0	Анион	λ_-^0
H ⁺	349,8	OH ⁻	197,6
Li ⁺	38,7	Cl ⁻	76,3
Na ⁺	50,1	Br ⁻	78,3
K ⁺	73,5	I ⁻	76,8
NH ₄ ⁺	73,4	NO ₃ ⁻	71,4
Ag ⁺	61,9	ClO ₄ ⁻	68,0
Tl ⁺	74,7	HCO ₃ ⁻	44,5
1/2 Mg ²⁺	53,1	HCO ₂ ⁻	54,6
1/2 Ca ²⁺	59,5	CH ₃ CO ₂ ⁻	40,9
1/2 Sr ²⁺	50,5	ClCH ₂ CO ₂ ⁻	39,8
1/2 Ba ²⁺	63,6	CNCH ₂ CO ₂ ⁻	41,8
1/2 Cu ²⁺	54	CH ₃ CH ₂ CO ₂ ⁻	35,8
1/2 Zn ²⁺	53	CH ₃ (CH ₂) ₂ CO ₂ ⁻	32,6
1/3 La ³⁺	69,5	C ₆ H ₅ CO ₂ ⁻	32,3
1/3 CO(NH ₂) ₃ ³⁺	102	HC ₆ O ₄ ⁻	40,2
		1/2 C ₆ O ₄ ²⁻	74,2
		1/2 SO ₄ ²⁻	80
		1/2 Fe(CN) ₆ ³⁻	101
		1/4 Fe(CN) ₆ ⁴⁻	111

Коэффициенты диффузии неорганических веществ,
растворенных в воде [1]

Растворенное вещество	Концентрация, моль/л	t, °C	D, 10 ⁻⁵ см ² /сек
Br ₂	0,00105 0,00173 0,00183 0,00193 0,00230 0,00309 0,00429 0,00501	25 25 25 25 25 25 25 25	1,25 1,24 1,235 1,23 1,22 1,202 1,193 1,18
CO ₂	0	18	1,46
CaCl ₂	0,29 0,37 1,5	9 9 9	0,79 1,09 0,84
CdSO ₄	0 0,5 1,0 1,5 2,0 3,0 3,5 4,5 5,5 6,5 7,0	16,8 16,8 16,8 16,8 16,8 16,8 16,8 16,8 16,8 16,8 16,8	0,35 0,34 0,33 0,44 0,43 0,44 0,34 0,36 0,4 0,45 0,48
Cl ₂	0,1 0,1	12 16,3	1,4 1,3
CoCl ₂	0,0062 0,0127	18 11	0,7 0,73
CuCl ₂	1,5	10	0,5
CuSO ₄	0,1 0,5 0,95	17 17 17	0,45 0,34 0,27
D ₂ O	0	25	2,5
H ₂	0	18	3,6
HCl	0 0 0,02 0,02 0,05 0,05 0,2 0,2 0,35 0,35 0,43 1,0 2,0 2,0	10 25 10 25 10 25 10 25 10 25 0 25 0 11	2,2 3,1 2,1 3,0 2,0 2,9 2,1 3,0 2,1 3,1 1,6 3,6 1,8 2,5

Растворенное вещество	Концентрация, моль/л	t, °C	D, 10 ⁻⁵ см ² /сек
HCl	5,0 6,5 8,0 9,0	0 11 0 11,5	2,2 3,1 2,7 3,4
HNO ₃	0,84 3,0 3,0 20	5,5 6,0 7 9	1,7 1,8 2,4 1,3
H ₂ O	0,011 0,99 0,103	20 20 20	0,89 1,05 1,00
KBr	1,0	10	1,2
K ₂ CO ₃	3,0	10	0,70
KCl	0,00125 0,00194 0,00325 0,00585 0,00704 0,00980 0,02 0,1 0,5 0 0,05 0,10 0,20 0,50 1,00 1,5 2,00	25 25 25 25 25 25 25 25 25 18,5 18,5 18,5 18,5 18,5 18,5 18,5 18,5	1,96 1,95 1,95 1,94 1,93 1,92 1,94 1,89 1,82 1,7 1,56 1,54 1,53 1,55 1,61 1,67 1,73
KI	0,01 0,01 0,10 0,10 1,0 1,0 5,5 5,5	10 18 10 18 10 18 10 18	1,3 1,7 1,24 1,61 1,21 1,59 1,37 1,8
KNO ₃	0,05 0,20 0,40 0,80 1,0 2,0 2,5	18 18 18 18 18 18 18	1,45 1,39 1,35 1,28 1,24 1,15 1,17
KOH	0,1 0,9 3,9	13,5 13,5 13,5	2,0 2,16 2,82
K ₂ SO ₄	0,02 0,05 0,28 0,95	19,6 19,6 19,6 19,6	1,27 1,12 1,0 0,92

Растворенное вещество	Концентрация, моль/л	t, °C	D, 10 ⁻⁵ см ² /сек
LiBr	2,3	10	0,93
	4,4	10	1,04
LiCl	0,01	9	0,88
	0,01	18	1,16
	1,0	9	0,81
	1,0	18	1,06
	4,2	9	0,84
	4,2	18	0,11
LiI	1,3	10	0,93
MgSO ₄	0,5	15,5	0,54
	1,0	15,5	0,53
	3,0	15,5	0,59
	4,5	15,5	0,73
N ₂	0	18	1,63
NH ₃	0,683	4	1,23
	3,55	4,5	1,23
NaBr	2,9	10	1,0
Na ₂ CO ₃	2,4	10	0,45
NaCl	0,05	18,5	1,26
	0,40	18,5	1,2
	1,00	18,5	1,24
	2,0	18,5	1,29
	3,0	18,5	1,36
	4,0	18,5	1,43
NaI	1,0	10	0,93
	2,0	10	1,04
NaNO ₃	0,6	13	1,04
	3,0	10,5	0,88
	5,0	10,5	0,96
	6,0	13	0,90
NO	0	16	1,54
I ₂	0,05	25	1,25
O ₂	0	25	2,60
NaOH	0,02	12	1,3
	0,10	12	1,29
	0,90	12	1,21
	3,9	12	1,14
N ₂ SO ₄	1,4	10	0,76
NaCH ₃ COO	0,2	12	0,71
Ni(NO ₃) ₂	0,0088	18	0,667
	0,0226	18	0,822
	0,068	18	0,93

Растворенное вещество	Концентрация, моль/л	t, °C	D, 10 ⁻⁵ см ² /сек
Pb(NO ₃) ₂	0,22	12	0,82
	0,82	12	0,76
ZnSO ₄	0,025	19,5	0,58
	0,050	19,5	0,54
	0,55	19,5	0,12
	2,95	19,5	0,38
Zn(CH ₃ COO) ₂	2,0	0	0,139
	2,0	18	0,243

Таблица 17.14

Коэффициент диффузии органических соединений
в водных растворах [6]

Растворенное вещество	t, °C	Концентрация, моль/л	D, 10 ⁻⁵ см ² /сек
Аллаксан	20	0	0,67
Арабиноза	20	0	0,70
Ацетамид	20	0	1,05
Ацетонитрил	15	0	1,26
Гидрохион	20	0	0,78
Глицерин	10	0,125	0,63
Глюкоза	15	0	0,52
Кислота винная	15	0,01	0,61
» уксусная	12,5	0	0,91
Кофеин	10	0	0,42
Лактоза	20	0	0,46
Мальтоза	20	0	0,426
»	10	0	0,328
Маннит	20	0	0,605
Мочевина	12	0	0,99
Никотин	20	0	0,53
Пентаэритрит	20	0	0,69
Пирогаллол	15	0	0,56
Рафиноза	20	0,05	0,36
Резорцин	20	0	0,77
Сахароза	12	0	0,36
Сероводород	15	0	1,43
Спирт аллиловый	15	0	0,90
» бутиловый	15	0	0,77
» изоамиловый	15	0	0,69
» метиловый	15	0	1,28
» пропиловый	15	0	0,87
» этиловый	15	0	1,00
Уретан	15	0	0,87

Таблица 17.15

Коэффициент диффузии различных веществ в метиловом спирте (концентрация раствора 1%, $t = 15^\circ \text{C}$) [6]

Растворенное вещество	$D, 10^{-5} \text{ см}^2/\text{сек}$	Растворенное вещество	$D, 10^{-5} \text{ см}^2/\text{сек}$
Аллиловый спирт	1,80	трихлоруксусная	1,45
Анилин	1,49	фталевая	1,30
Ацетанилид	1,50	хлорбензойная	1,29
Ацетилдифениламин	0,98	хлоруксусная	1,52
Ацетонитрил	2,64	м-Нитробензальдегид	1,24
Бензальдегид	1,66	Нитрофенол	1,38
Броманилин	1,41	Пиридин	1,58
Бромбензол	1,75	Салол	1,29
Бромнитрофенол	1,43	2, 4, 6-Трибромфенол	1,12
3-Бромпропилен	2,22	2,4,6-Тринитрофенол	1,32
Бромфенол	1,34	2, 4, 6-Трихлорфенол	1,21
Ванилин	1,00	Уретан	1,41
Гидрохинон	1,25	Фенетол	1,40
Дибензиламин	0,86	Фенилацетат	1,62
n-Дибромбензол	1,55	Фенол	1,40
Дибромнафталин	1,33	Фенолфталеин	0,78
Диодметан	1,68	Фурфурол	1,70
м-Динитробензол	1,56	Хлоралгидрат	1,16
Динитронафталин	1,32	Хлоранилин	1,34
2, 4-Динитрофенол	1,40	Хлорбромметан	2,50
1, 1-Динитрогидрин	1,36	1-Хлоргидрин	1,30
Дихлорнафталин	1,52	Хлорнитробензол	1,68
Изоамиловый спирт	1,34	Хлороформ	2,07
Иодбензол	1,65	Хлорфенол	1,32
Иодоформ	1,83	Четыреххлористый углерод	1,70
3-Иодпропилен	1,72	Этил бромистый	2,40
Кислота: промпропионовая	1,35	» иодистый	2,16
дихлоруксусная	1,36	Этилен бромистый	1,95
иодпропионовая	1,36	» иодистый	1,56
молочная	1,36	Этилниитрат	2,20
пропионовая	1,62		
трибромуксусная	1,23		

Таблица 17.16

Коэффициент диффузии веществ в бензоле (концентрация раствора 1%, $t = 15^\circ \text{C}$) [6]

Растворенное вещество	$D, 10^{-5} \text{ см}^2/\text{сек}$	Растворенное вещество	$D, 10^{-5} \text{ см}^2/\text{сек}$
Альдегид салициловый	1,78	n-Дибромбензол	1,37
Ацетилдифениламин	0,90	Дибромнафталин	1,25
Бензальдегид	1,73	м-Динитробензол	1,54
Бром (0,1 М, 12°C)	2,00	Динитронафталин	1,23
Броманилин	1,41	n-Дихлорбензол	1,90
Бромбензол	1,86	Дяхлорнафталин	1,40
α-Бромнафталин	1,30	Иод (0,05М, 20°C)	1,95
Бромнитробензол	1,33	Иодбензол ($<1\%$, 8°C)	1,35
Бромформ (18°C)	1,62	Иодоформ	1,38
Бромфенол	1,34	Кислота бензойная	1,36
Гексахлорбензол ($<1\%$, 8°C)	1,02	» фталева	1,37
		» хлоруксусная	1,48
		Метилсалицилат	1,56

Продолжение табл. 17.16

Растворенное вещество	$D, 10^{-5} \text{ см}^2/\text{сек}$	Растворенное вещество	$D, 10^{-5} \text{ см}^2/\text{сек}$
Нафталин ($<1\%$, 8°C)	1,19	1, 2, 3-Трихлорпропан	1,72
Нитробензол	1,84	Фенантрен ($<1\%$, 8°C)	0,95
α-Нитронафталин	1,39	Фенол (5°C)	1,27
Спирт изоамиловый	1,48	Хинон	1,68
» пропиловый	1,60	Хлоранилин	1,56
1, 2, 4, 5-Тетрахлорбензол ($<1\%$, 8°C)	1,24	Хлорбензол	1,42
Тринитротолуол	1,39	α-Хлорнафталин	1,20
2, 4, 6-Тринитрофенол	1,39	Хлоринитробензол	1,70
1, 2, 4-Трихлорбензол ($<1\%$, 8°C)	1,34	Хлороформ	2,11
		Хлорфенол	1,42
		Этилен бромистый	1,97
		» иодистый	1,40
		Эфир этиловый	2,21

Таблица 17.17

Коэффициент диффузии веществ в различных растворителях [6]

Растворитель	Растворенное вещество	Концентрация, моль/л	$t, ^\circ \text{C}$	$D, 10^{-5} \text{ см}^2/\text{сек}$
Анизол	Иод	0,1	20	1,13
Ацетон	Бромформ	0	20	2,73
Бромформ	Ацетон	0,25	20	0,272
»	Бензол	1	20	1,69
»	Метанол	0,5	20	1,93
»	Спирт этиловый	0,5	20	0,976
»	» пропиловый	1	20	0,77
»	» амиловый	1	20	0,516
»	Эфир этиловый	0,25	20	0,342
Гексан	Бромбензол	0	7	2,60
Гептан	Иод	0,1	20	2,67
Декалин	Бромбензол	0	7	0,47
»	α-Бромнафталин	0	7	0,34
Кислота уксусная	Иод	0	7	1,51
То же	Бромбензол	0,1	20	1,68
»	Иод	0,1	16	3,60
Сероуглерод	Бром	0	19	3,40
»	Фенол	0	19	0,20
Спирт изоамиловый	»	0	19	0,20
Спирт этиловый	Азобензол	0,2	20	0,74
»	Аконитин	0,04	20	0,27
»	Спирт аллиловый	1	20	0,95
»	Спирт амидовый	1	20	0,76
»	Ацеталь	1	20	1,13
»	Ацетамид	0	20	0,67
»	Ацетон	0	20	0,556
»	Бромнафталин	0,5	20	0,740
»	Бромформ	0,5	20	0,976
»	Бруцин	0,062	20	0,28
»	Гидрохинон	0	20	0,488
»	Глицерин	0	20	0,532
»	Иод	0,1	8	0,90
»	Иодбензол	0,25	20	0,97
»	Камфара	0,5	20	0,694
»	Пиридин	0,5	20	1,11
»	Резорцин	0	20	0,451
»	Салигенин	0	20	0,608

Продолжение табл. 17.17

Растворитель	Растворенное вещество	Концентрация, моль/л	t, °C	D, 10 ⁻⁵ см ² /сек
Спирт этиловый	Кислота стеариновая	0,2	20	0,59
» »	Фенол	0,1	20	0,80
» »	Хлорал	1	20	0,614
» »	Хлороформ	1	20	1,25
Эфир этиловый	Бромбензол	0	7	3,25
» »	Бромформ	0	17	3,30
» »	Нитробензол	0	8	3,24
» »	Фенол	0	19	3,60
Тетралин	Бромбензол	0	7	0,48
»	α-Бромнафталин	0	7	0,36
Тетрахлорэтан	Тетрабромэтан	0,06	50	0,94
Толуол	Бромбензол	0	7	1,59
»	Иод	0,1	20	1,95
Углерод четыреххлористый	»	0,1	20	1,36
Хлороформ	»	0,05	10	1,93
»	Фенол	0	10	1,60
Циклогексан	Бромбензол	0	7	1,14
Этилацетат	Иод	0,1	20	2,15
Этилбензол	Бромбензол	0	7	1,44
Эфир дибензиловый	α-Бромнафталин	0	7	0,149

Таблица 17.18

Коэффициент диффузии веществ в расплавленных солях [6]

Диффундирующее вещество	Среда	t, °C	D, 10 ⁻⁵ см ² /сек
AgNO ₃	KNO ₃	360	4,56
AgNO ₃	KNO ₃	390	4,86
AgNO ₃	NaNO ₃	330	4,57
AgNO ₃	NaNO ₃	360	5,06
AgBr	KBr	780	4,92
AgCl	KCl	720	4,63
AgCl	KCl	780	5,10
AgCl	KCl; LiCl	480	5,61
AgCl	KCl; LiCl	740	6,61
Ba(NO ₃) ₂	KNO ₃	370	2,06
Ba(NO ₃) ₂	NaNO ₃	360	3,71
KBr	KNO ₃	360	3,01
KCl	KNO ₃	360	2,96
PbCl ₂	KCl; LiCl	530	2,06
PbCl ₂	KCl; LiCl	720	4,40
NaNO ₃	KNO ₃	360	5,22
Sr(NO ₃) ₂	KNO ₃	360	2,81
Sr(SO ₄) ₂	NaNO ₃	345	4,17
TiBr	KBr	770	4,28
TiCl	KCl; LiCl	520	3,10
TiCl	KCl	720	3,14
TiNO ₃	KNO ₃	345	3,17
TiNO ₃	Na ₂ NO ₃	360	4,31

Таблица 17.19

Коэффициент диффузии в амальгамах [4]

Металл	t, °C	D, 10 ⁻⁵ см ² /сек	Металл	t, °C	D, 10 ⁻⁵ см ² /сек
Li	25	0,93	Zn	25	2,4
Na	25	0,86	Cd	25	2,0
K	25	0,71	Sn	25	2,1
Rb	7,3	0,53	Bi	25	1,5
Cs	25	0,64	Pb	25	2,1
Ag	16	1,11	Ba	7,8	0,60
Au	25	0,73	Sr	9,4	0,54
Tl	25	1,18	Ca	10,2	0,62

Таблица 17.20

Коэффициент диффузии в расплавленных металлах [4]

Диффундирующий металл	Среда диффузии	t, °C	D, 10 ⁻⁵ см ² /сек	Диффундирующий металл	Среда диффузии	t, °C	D, 10 ⁻⁵ см ² /сек
Mg	Al	700	7,54	Rh	Pb	500	3,52
Au	Bi	500	5,22	Pt	Pb	490	1,95
Si	Fe	1480	2,4	Ag	Sn	500	4,8
Si	Fe	1560	10,8	Au	Sn	500	5,37
Au	Pt	50	3,7	Pb	Sn	500	3,68

17.3. ДИФфуЗИЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Основным источником информации о коэффициентах диффузии в твердом теле, так же как и в жидкости, является эксперимент. При этом, вследствие крайней чувствительности результатов измерений к чистоте исследуемого вещества и к температурным колебаниям, результаты различных измерений характеризуются разбросом в пределах порядка величины. Данные, представленные в таблицах, усреднены по нескольким измерениям, при этом, в силу произвольного способа усреднения, указанные данные справедливы по порядку величины.

Температурная зависимость коэффициента диффузии в твердом теле описывается простой полуэмпирической формулой

$$D = D_0 \exp(-Q/kT), \quad (17.15)$$

где Q — энергия активизации; D_0 — фактор диффузии. Соотношение (17.15) выполняется в широком диапазоне температур в пределах точности измерений коэффициента диффузии. Для веществ, имеющих кристаллическую структуру, коэффициент диффузии является тензором. Приведенные ниже данные являются обычно результатом усреднения этого тензора по направлениям. В отдельных случаях приводятся значения коэффициента диффузии в направлениях, параллельном ($D_{||}$) и перпендикулярном ($D_{\perp}$) к главной оси кристалла. В табл. 17.21—17.31 представлены значения параметров, входящих в соотношение (17.15), а также интервал температуры, где производились измерения.

Параметры выражения (17.15) в различных диапазонах температур [7]

Металл	Температурный интервал, °C	D_0 , см ² /сек	Q , ккал/моль
Ag	450—900	0,81	45,6
Al	330—460	0,10	30,5
	450—650	1,71	34
Аш	600—950	0,031	39,36
	850—1050	0,107	42,26
Co	770—1050	0,50	65,4
	1000—1300	0,2	62
Cu	500—1000	70,0	56,0
	700—900	120	66,3
α -Fe	900—1200	3,6	71
γ -Fe	1070—1350	1,05	67,8
	1407—1515	6,8	61,7
δ -Fe	700—1100	0,48	65,8
Ni	1042—1404	1,9	68
Pb	174—322	0,281	24,2
Pd	1050—1500	0,205	63,6
Pt	1250—1725	0,22	66,5
δ -Pu	35—440	0,0045	23,8
α -Th	1100—1400	700	83,5
β -Th	1450—1550	10 ⁵	99,7
Be, $\perp$	550—1050	0,52	37,6
Be, $\parallel$	550—1050	0,62	39,4
Ta	1250—2200	0,12	98,7
	1827—2527	2	110
α -U	580—650	0,002	40
β -U	700—755	0,0135	42
γ -U	800—1050	0,002	27
V	880—1356	0,36	73,65
	1356—1833	214	94,14

Металл	Температурный интервал, °C	D_0 , см ² /сек	Q , ккал/моль
Sb, $\perp$	500—630	0,10	35,8
Sb, $\parallel$	500—630	56	48
Cd, $\perp$	110—315	0,10	19,1
Cd, $\parallel$	110—315	0,05	18,2
Mg, $\perp$	468—635	1,5	32,5
Mg, $\parallel$	468—635	1,0	32,2
α -Ti	690—850	$6,4 \cdot 10^{-8}$	29,3
β -Ti	895—1580	0,0016	35
α -Ti, $\perp$	150—275	0,4	22,6
	200—415	0,39	24,9
α -Ti, $\parallel$	200—410	0,08	22,0
α -Zr	300—700	$5 \cdot 10^{-8}$	22
	650—827	$5 \cdot 10^{-2}$	52
β -Zr	900—1500	0,0024	38
	900—1750		27,7
Cr	950—1250	10^{-4}	52,7
	1200—1600	0,28	73,8
Hf	1795—1995	0,0012	38,7
Li	—65÷250	0,24	13,2
Mo	1700—1920	2,77	111
	1850—2350	0,3	95
Na	—65÷250	0,20	10
Nb	878—2400	1,1	96
ϵ -Pu	500—610	0,022	18,5
Rb	—65÷250	0,23	9,4
W	1287—1453	$6,3 \cdot 10^7$	135,8
	2000—2700	0,54	120,5
	2660—3230	42,8	153,1
In, $\perp$	44—144	3,7	18,7
In, $\parallel$	44—144	2,7	18,7
β -Sn, $\perp$	160—228	10,7	25,2
β -Sn, $\parallel$	160—228	7,7	25,6
Cs	830—1030	47	61,4
	750—950	11	57,2

Таблица 17.22

Параметры выражения (17.15) для коэффициента самодиффузии в твердых диэлектриках [7]

Параметр	Ag	C (графит)	Ge	α -Р белый	Xe
t , °C	—195	1995—2347	730—915	0—30	—152÷—115
D_0 , см ² /сек	350	10	10,8	$1,07 \cdot 10^{-3}$	7,3
Q , ккал/моль	4,15	163	69,4	9,4	7,4

Таблица 17.23

Параметры выражения (17.15) для диффузии малой примеси в серебре

Примесь	T, °K	D ₀ , см ² /сек	Q, ккал/моль
Fe	718—927	2,42	49,04
Co	—	104	59,9
Ni	750—950	21,9	54,8
Cu	700—950	1,23	46,1
Zn	640—925	0,54	41,7
Ge	—	0,084	36,5
Ru	794—945	180	65,8
Pd	735—939	9,57	56,75
Ag	450—900	0,81	45,6
Cd	592—937	0,44	41,7
In	592—937	0,41	40,6
Sn	592—937	0,25	39,3
Sb	468—942	0,17	38,3
Au	650—950	0,26	45,5
Hg	650—950	0,08	38,1
Tl	650—800	0,15	37,9
Pb	700—825	0,22	38,1

Таблица 17.24

Параметры выражения (17.15) для диффузии малой примеси в меди

Примесь	T, °K	D ₀ , см ² /сек	Q, ккал/моль
Fe	719—1074	1,4	51,8
Co	701—1077	1,93	54,1
Ni	743—1076	2,7	56,5
Cu	500—1000	70	56
Zn	—	0,34	45,6
Ga	—	0,55	45,9
As	—	0,12	42,0
Pd	807—1056	1,71	54,37
Ag	—	0,63	46,5
Cd	—	0,93	45,67
Sb	600—1000	0,34	42,0
Au	700—1000	0,15	45,7
Hg	—	0,35	44
Tl	785—996	0,71	43,3

Таблица 17.25

Параметры выражения (17.15) для диффузии малой примеси в золоте

Примесь	T, °K	D ₀ , см ² /сек	Q, ккал/моль
Fe	701—948	0,082	41,6
Co	702—948	0,068	41,6
Ni	702—948	0,034	42,0
Ag	700—1007	0,072	40,2
Au	704—1048	0,091	41,7
Pt	799—1055	7,6	60,9
Hg	499—1027	0,116	37,4

Таблица 17.26

Параметры выражения (17.15) для диффузии малой примеси в никеле [7]

Примесь	t, °C	D ₀ , см ² /сек	D, ккал/моль
Mg	800—970 1100—1300	2,3·10 ⁻⁵ 0,44	31,3 56
Al	800—970 1100—1300	1,1 1,87	59,5 64
Si	800—970 1100—1300	10,6 1,5	64,7 61,7
Ti	1100—1300	0,86	61,4
Cr	690—900 1100—1268	0,03 1,1	40,8 65,1
Mn	1100—1300	7,5	67,1
Fe	900—1500	0,8	61
Co	748—1192 1155—1373	0,75 1,11	64,7 64,9
Cu	1054—1359	0,57	61,7
Mo	1100—1300	3	68,9
W	1100—1300	11,1	76,8
Au	900—1100	2	65

Таблица 17.27

Параметры температурной зависимости коэффициента диффузии малой примеси в β-Ti, аппроксимируемой выражением

$$D = D_{01} \exp(-Q_1/kT) + D_{02} \exp(-Q_2/kT)^*$$

Примесь	t, °C	D ₀₁ , 10 ⁻⁴ см ² /сек	Q ₁ , ккал/моль	D ₀₂ , 10 ⁻⁴ см ² /сек	Q ₂ , ккал/моль
Ti	900—1540	2	29,8	1,0	59,8
P	945—1600	36,2	24,1	5	56,5
Sc	919—1290	21	32,7	34	—
V	900—1550	10	34,7	3,4	61,5
Cr	950—1640	74	36,6	14	65,5
Mn	940—1640	76	34,3	12	64,5
Fe	910—1640	80	30	15	60,7
Co	920—1640	130	30,9	16	61,3
Ni	940—1640	170	31,6	20	60
Nb	1000—1640	13	34,9	9,5	69,5
Mo	900—1640	7	36,9	3,6	65
Sn	953—1595	38	31,6	9,5	69,5
Ta	1000—1600	7,2	36	50	80

* При низких температурах преобладает первый член выражения, при высоких — второй.

Параметры выражения (17.15) для взаимной диффузии металлов и сплавов [1]

Диффундирующий элемент	Диффузионная среда	Концентрация диффундирующего элемента, ат. %	$t, ^\circ\text{C}$	$D_0, \text{см}^2/\text{сек}$	$Q, \text{ккал/моль}$
Ag	Al	1,26	466—573	1,1	32,6
	Au	9	850—1000	$2,9 \cdot 10^{-2}$	38,0
	Cu	3	720—800	$2,9 \cdot 10^{-2}$	37,2
	Pb	< 0,12	220—285	$7,4 \cdot 10^{-2}$	15,2
Al	Cu	15—21	500—850	$7,1 \cdot 10^{-2}$	39,2
Au	Ag	100	218—601	$5,3 \cdot 10^{-4}$	29,8
		18,4	767—916	$1,1 \cdot 10^{-4}$	26,6
	Cu	2,4—3,5	400—970	$6,8 \cdot 10^{-6}$	22,5
	Pb	100 или 0,03—0,09	100—300	0,35	14,0
B	$\alpha\text{-Fe}$	—	—	10^5	62,0
Bi	Pb	2,0	220—285	$1,83 \cdot 10^{-2}$	18,4
C	Fe	Карбонизация	800—1100	$1,67 \cdot 10^{-2}$	28,7
		1,1 вес. %	900—1250	0,486	36,6
		0,1—1 вес. %	750—1250	$0,12 \pm 0,07$	32,6
	$\alpha\text{-Fe}$	—	—	$7,9 \cdot 10^{-3}$	18,1
		—	—	$2 \cdot 10^{-2}$	20,1
Cd	Ag	2,0	650—895	$4,9 \cdot 10^{-5}$	22,35
		—	—	0,44	41,7
	Cu	3	720—860	$3,04 \cdot 10^{-4}$	23,7
	Pb	1,6	167—252	$1,83 \cdot 10^{-3}$	15,4
Co	$\alpha\text{-Fe}$	—	—	0,4	54
	$\gamma\text{-Fe}$	—	—	$1,2 \cdot 10^5$	104
	Сталь	—	—	90	80
Cr	$\alpha\text{-Fe}$	—	—	$3 \cdot 10^4$	82
	$\gamma\text{-Fe}$	—	—	$1,8 \cdot 10^4$	97
	Сталь	—	—	10	75
Cs	W	1-й адсорбционный слой	27—427	0,2	14,0
		2-й адсорбционный слой	27—427	$1,64 \cdot 10^{-3}$	23,0
Cu	Ag	2,0	650—895	$5,9 \cdot 10^{-5}$	24,8
	Al	Эвтектика	440—540	2,3	34,9
		0,85 или 0,17	457—565	$8,4 \cdot 10^{-2}$	32,6
	Au	100	301—616	$1,06 \cdot 10^{-3}$	27,4
		25,6	443—740	$5,8 \cdot 10^{-4}$	27,4
	Ge	—	—	$1,9 \cdot 10^{-4}$	4,1
	Pt	13,9	1041—1461	$4,8 \cdot 10^{-2}$	55,7
	$\beta\text{-Латунь (45% Zn)}$	—	—	$3,8 \cdot 10^{-2}$	24,9
Fe	Au	18,3	753—1003	$1,16 \cdot 10^{-4}$	24,4
	20%Fe, Ni — C	—	—	$18 \cdot 10^{-0,92} [\text{C}]^*$	$(75 \div 6) [\text{C}]^*$
		—	—	$71 \cdot 10^{-0,65} [\text{C}]$	$(75 \div 5) [\text{C}]$
	Ni	—	—	$8,4 \cdot 10^{-2}$	51,0
	W	0,04	1927—2527	11,5	140,0
Ge	Ce	Самодиффузия	—	87	73,5
Hg	Cd	4	156—202	2,6	19,6
In	Ag	20	650—895	$7,3 \cdot 10^{-5}$	24,4
		—	—	0,41	4063
Li	Ge	—	—	$2,5 \cdot 10^{-3}$	11,8
	Si	—	—	$2,3 \cdot 10^{-3}$	15,2
Mg	Al	Эвтектика	365—440	$1,5 \cdot 10^{-2}$	38,5
		5,5—11,0	395—577	0,12	28,6
Mn	Cu	8—11,4	400—850	$7,2 \cdot 10^{-6}$	23,2
Mo	W	Монокристалл	1533—2260	$6,3 \cdot 10^{-4}$	80,5
		Поликристалл	1533—2260	$5 \cdot 10^{-3}$	80,5
N	Fe	—	—	$3,1 \cdot 10^{-3}$	18,0
		—	—	$3 \cdot 10^{-3}$	18,2
		—	—	$6,6 \cdot 10^{-3}$	18,6
	Th	—	—	$2,1 \cdot 10^{-3}$	22,5
	$\alpha\text{-Ti}$	—	—	$1,2 \cdot 10^{-2}$	45,3
	$\beta\text{-Ti}$	—	—	0,35	33,8

* [C] — концентрация углерода, ат. %.

Диффундирующий элемент	Диффузионная среда	Концентрация диффундирующего элемента, ат. %	$t, ^\circ\text{C}$	$D_0, \text{см}^2/\text{сек}$	$Q, \text{ккал/моль}$
Ni	Au	15,0	800—1003	$1,74 \cdot 10^{-3}$	31,2
	Cu	7,5—11,8	550—950	$6,5 \cdot 10^{-5}$	29,8
	Pt	14,9	1043—1401	$7,8 \cdot 10^{-4}$	43,1
O	β -Ti	—	—	1,6	48,2
Pd	Ag	20,2	444—917	$6,4 \cdot 10^{-6}$	20,2
	Au	17,1	727—970	$1,13 \cdot 10^{-3}$	21,9
	Cu	4,3—6,2	490—960	$1,6 \cdot 10^{-6}$	39,0
Pt	Au	20,1	740—986	$1,24 \cdot 10^{-3}$	39,0
	Cu	2,4—3,5	490—960	$1,0 \cdot 10^{-6}$	21,9
Sb	Ag	2,0	650—895	$5,3 \cdot 10^{-5}$	21,7
Si	Al	0,5	465—600	0,9	30,55
Sn	Ag	20	650—895	$7,8 \cdot 10^{-5}$	21,4
	Cu	3,9—5,6	400—850	$4,1 \cdot 10^{-3}$	31,2
	Pb	2,0	245—285	4,0	26,2
β -Sn	W	Диффузия на границе между зернами	1780—2227	1,13	94,0
Th	—	Объемная диффузия	2127	1,0	120
	—	Поверхностная диффузия	1380	0,47	66,4
	—	2,0	220—285	$2,5 \cdot 10^{-2}$	19,4
Tl	Pb	—	1727	1,14	100,0
U	W	α -Fe	—	380	70
W	—	γ -Fe	—	10^3	90
	—	Сталь	—	13	75
Y	W	—	1727	0,11	62
Zn	Zn	Самодиффузия в Zn чистотой 99,999%	—	0,22	14,3
	—	99,99%	—	0,38	14,6
	—	0,84	415—555	12	27,8
—	Al	6,8—9,7	360—880	$3 \cdot 10^{-6}$	19,7
	Cu	3	720—860	$3,7 \cdot 10^{-6}$	22,0
	—	0—28,6	641—884	$3,2 \cdot 10^{-3}$	42,0
Zr	β -Латунь	—	—	0,024	22,8
	W	—	1727	1,1	78,0

Таблица 17.29

Параметры соотношения (17.15) для диффузии металлов в солях [1]

Диффундирующий металл	Диффузионная среда	$D_0, \text{см}^2/\text{сек}$	$Q, \text{ккал/моль}$
Au	NaCl	0,2	24,6
	KCl	11,0	30,0
Cu	NaCl	0,5	25,4
	KCl	55,0	20,4
Ni	NaCl	0,2	25,4

Таблица 17.30

Параметры соотношения (17.15) для диффузии иона Ag^+ в кристаллах [1]

Диффузионная среда	$T, ^\circ\text{C}$	$D_0, \text{см}^2/\text{сек}$	$Q, \text{ккал/моль}$
α -AgI	454—774	—	2,26
α -CuI	685—753	$4,5 \cdot 10^{-3}$	6,76
α -CuS	586—1192	$3,27 \cdot 10^{-4}$	4,57
α -Cu ₂ Te	603—794	2,4	20,86
α -AgI	451—701	$1,63 \cdot 10^{-4}$	2,26
α -Ag ₂ S	443—694	$4,6 \cdot 10^{-4}$	3,18
α -Ag ₂ Se	421—673	$1,55 \cdot 10^{-4}$	2,94
α -Ag ₂ Te	428—678	$3,85 \cdot 10^{-5}$	2,66
α -Ag ₂ I	473—653	$5,83 \cdot 10^{-3}$	4,57
NaCl	< 550	1,6	17,70
	> 550	3,13	41,40
PbCl ₂	439—743	7,7	36,8
PbI ₂	387—438	4,9—10,6	30,0
	528—588	10,6	30,4
PbS	733—1043	1,3	42,0
NaBr	—	50	47,5
α -Ag ₂ Se	—	$6,7 \cdot 10^{-4}$	20,04

Таблица 17.31

Коэффициенты диффузии ионов в кристаллах при различных температурах [1]

Диффундирующий ион	Диффузионная среда	T, °C	D, 10 ⁻⁶ см ² /сек
Ag ⁺	α-AgI	454	17,7
		500	21,2
		551	28,7
		594	33,3
		651	40,1
		701	46,1
		744	48,5
		518	51
		685	15,6
		722	22,5
Cu ⁺	α-Cu ₂ S	753	23,8
		503	1,85
		603	4,6
		693	9,4
		603	0,359
		749	1,98
		794	4,66
		723	0,139
		511	0,24
		753	37—41
Li ⁺	α-Ag ₂ S	443	0,4
		503	4,1
		603	6,3
		693	16,5
		723	0,116
		573	0,023
		473	4,5
		523	11
		578	15
		653	23
Na ⁺ Pb ⁺⁺	AgCl	573	2,1 · 10 ⁻⁴
		573	2,3 · 10 ⁻³
		439	1,7 · 10 ⁻¹¹
		498	1,97 · 10 ⁻⁹
		743	0,336
		387	7,3 · 10 ⁻¹¹
		420	1,35 · 10 ⁻⁹
		438	7,35 · 10 ⁻⁹
		453	1,1 · 10 ⁻⁴
		844	1,1 · 10 ⁻³
Cl ⁻ Se ²⁻	Cu ₂ S	967	4,9 · 10 ⁻³

Таблица 17.32

Коэффициенты взаимной диффузии твердых солей [1]

Диффундирующее вещество	Диффузионная среда	t, °C	D, 10 ⁻¹¹ см ² /сек
Ag (из AgNO ₃)	Na-стекло	354	25,2
	Na-пермутит	354	14,8
Ag ₄ Sn	Cu ₄ Sn	450	231
BaMoO ₄	BaWO ₄	950	9,61
BaWO ₄	BaMoO ₄	950	3,47
MgMoO ₄	MgWO ₄	800	2,31
MgWO ₄	MgMoO ₄	800	1,39
SrMoO ₄	SrWO ₄	950	9,14
SrWO ₄	SrMoO ₄	950	3,01
ZnMoO ₄	ZnWO ₄	800	3,94
ZnWO ₄	ZnMoO ₄	850	6,36
		800	1,50
		850	2,89

Таблица 17.33

Параметры соотношения (17.15) для диффузии газов в твердых телах [1]

Диффундирующий газ	Диффузионная среда	t, °C	D ₀ , 10 ⁻⁶ см ² /сек	Q, ккал/моль
H ₂	SiO ₂	200	3,5—13,7	10,1
		500	8,3—14,5	
He	SiO ₂	20	3,5—7,9	5,5
		500	0,64—5,2	
NH ₃	Пирекс Анальдим*	20	1,3	8,7
		500	5,5	
		—	0,0025	11,48

* Природный алюмосиликат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник химика. Т. 3. М., «Химия», 1964.
2. Matrego T. R., Mason E. A. J. Phys. Chem. Ref. 1972, v. 1, p. 3.
3. Палкина Л. А., Смирнов Б. М., Чибисов М. И. Диффузия метастабильных атомов инертных газов в собственном газе. — «Ж. эксперим. и теор. физ.», 1969, т. 56, с. 340.

ГЛАВА 18

ЭФФЕКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ АТОМОВ И ИОНОВ

Понятия атомного и ионного радиусов в значительной мере условны. Межатомные расстояния и молекулярные диаметры всецело зависят от характера действующих сил в конкретном физическом процессе, из которого определяются «размеры» атомов. Эффективные размеры атомов и молекул могут быть вычислены по коэффициентам диффузии и вязкости, определенным из расстояний, на которые сближаются атомы в молекулах и кристаллах; из индикатрис рассеяния молекулярных пучков и т. д. В табл. 18.1 значения, заимствованные

из работы [1], представляют собой деленные пополам межатомные расстояния в кристаллических структурах с координационным числом 12; из работы [2] — расстояния максимальной плотности заряда в нейтральном атоме, а для ионов соответствующее расстояние измерено до точки, где радиальная плотность заряда падает до 10% своего максимального значения. Зарядность ионов указана в круглых скобках перед значением ионного радиуса.

Атомные и ионные радиусы, Å

Атомный номер	Химический символ	Атомный радиус	(Заряд нона) Ионный радиус
1	H	0,46[1]; 0,53[2]	(+1) 0,00; (—1) 1,36[1]; (—1) 2,02[2]
2	He	1,22[1]; 1,07[3]	
3	Li	1,55[1]; 1,61[2]	(+1)0,60[4]; (+1) 0,76[5]
4	Be	1,13[1]; 1,09[2]	(+2) 0,34[1]; (+2) 0,42[2]
5	B	0,91[1]; 0,84[2]	(+3) 0,20[1]; (+3) 0,32[2]
6	C	0,77[1]; 0,69[2]	(+4) 0,2[1]; (—4) 2,6[1]; (+4) 0,27[2];
7	N	0,71[1]; 0,63[2]	(—3)1,48[1]; (—3) 2,07[2]; (+5) 0,15[1]
8	O	0,56[2]	(—2) 1,36[1]; (—2) 1,46[2] (+6) 0,09[4]
9	F	0,53[2]	(—1) 1,29[2]; (+7) 0,19[4]
10	Ne	1,60[1]; 1,1[2]	
11	Na	1,89[1]; 2,05[2]	(+1) 0,98[1]
12	Mg	1,60[1]	(+2) 0,74[1]
13	Al	1,43[1]; 1,39[2]	(+3) 0,57[1]; (+3) 0,62[2]
14	Si	1,34[1]; 1,18[2]	(+4)0,39[1]; (+4)0,51[2]; (—4)2,71[5]
15	P	1,3[1]; 1,02[2]	(—3)1,86[1]; (—3)2,48[2]; (+5)0,35[1]
16	S	0,95[2]	(—2) 1,82[1]; (+6) 0,29[1]
17	Cl	0,89[2]	(—1) 1,81[1]; (+7) 0,26[1]
18	Ar	1,92[1]; 1,56[2]	
19	K	2,36[1]; 2,8[2]	(+1)1,33[1]
20	Ca	1,97[1]; 2,3[2]	(+2) 1,04[1]
21	Sc	1,64[1]; 2,0[2]	(+3) 0,83[1]
22	Ti	1,46[1]; 1,9[2]	(+2)0,78[1]; (+3)0,69[1]; (—4)0,64[1]
23	V	1,34[1]; 1,8[2]	(+2)0,72[1]; (+3)0,67 [1]; (—4) 0,61[1]; (+5)0,4[1]
24	Cr	1,27[1]; 1,7[2]	(+2)0,83[1]; (+3)0,64[1]; (—6)0,35[1]
25	Mn	1,30[1]; 1,7[2]	(+2)0,91[1]; (+3)0,70[1]; (+4) 0,52[1]; (+7) 0,46[1]
26	Fe	1,26[1]; 1,6[2]	(+2)0,80 [1]; (+3) 0,67[1]
27	Co	1,25[1]; 1,5[2]	(+2) 0,78[1]; (+3) 0,64[1]
28	Ni	1,24[1]; 1,4[2]	(+2)0,74[1]; (+3) 0,35[4]
29	Cu	1,28[1]; 1,4[2]	(+1)0,98[1]; (—2)0,80[1]
30	Zn	1,39[1]; 1,5[2]	(+2)0,83 [1]
31	Ga	1,39[1]	(+3) 0,62 [1]
32	Ge	1,39[1]	(+2)0,65[1]; (+4)0,44[1]; (—4) 2,72[6]
33	As	1,48[1]	(+3)0,69[1]; (+5)0,47[1]; (—3) 1,91[1]
34	Se	1,6[1]	(—2)1,93[1]; (+4)0,69[1]; (+6)0,35[1]
35	Br	1,05[2]	(—1) 1,96[1]; (+7) 0,39[1]
36	Kr	1,98[1]; 1,77[2]	
37	Rb	2,48[1]; 3,1[2]	(+1)1,49[1]
38	Sr	2,15[1]; 2,5[2]	(+2) 1,20[1]
39	Y	1,81[1]	(+3) 0,97[1]
40	Zr	1,60[1]	(+4) 0,82[1]
41	Nb	1,45[1]	(+4) 0,67[1]; (+5) 0,66[1]
42	Mo	1,39[1]	(+4) 0,68[1]; (+6) 0,65[1]
43	Tc	1,36[1]	
44	Ru	1,34[1]	(+4) 0,62[1]
45	Rh	1,34[1]	(+3) 0,75[1]; (+4) 0,65[1]
46	Pd	1,37[1]	(+4) 0,64[1]
47	Ag	1,44[1]	(+1) 1,13[1]; (+1) 1,22[2]
48	Cd	1,56[1]; 1,7[2]	(+2) 0,99[1]
49	In	1,66[1]	(+1) 1,30[1]; (+3) 0,92[1]

Продолжение табл. 18.1

Атомный номер	Химический символ	Атомный радиус	(Заряд иона) Ионный радиус
50	Sn	1,58[1]; 1,46[2]	(+2)1,02[1]; (+4)0,67[1]; (+4) 0,80[2]
51	Sb	1,61[1]	(+3)0,90[1]; (+5)0,62[1]; (-3) 2,08[1]
52	Te	1,7[1]	(-2)2,11[1]; (+4)0,89[1]; (+6)0,56[1]
53	I	1,24[2]	(-1) 2,20[1]; (+7) 0,50[1]
54	Xe	2,18[1]; 1,99[2]	
55	Cs	2,68[1]; 3,4[2]	(+1) 1,65[1]
56	Ba	2,21[1]; 2,8[2]	(+2) 1,38[1]; (+2) 1,47[2]
57	La	1,87[1]	(+3) 1,04[1]; (+4) 0,90[1]
58	Ce	1,83[1]	(+3) 1,02[1]; (+4) 0,88[1]
59	Pr	1,82[1]	(+3) 1,00[1]; (+4)0,90[6]
60	Nd	1,82[1]	(+3) 0,99[1]
61	Pm	—	(+3) 0,98[1]
62	Sm	1,81[1]	(+3) 0,97[1]
63	Eu	2,02[1]	(+3) 0,97[1]
64	Gd	1,79[1]	(+3) 0,94[1]
65	Tb	1,77[1]	(+3) 0,89[1]; (+4) 0,84[6]
66	Dy	1,77[1]	(+3) 0,88[1]
67	Ho	1,76[1]	(+3) 0,86[1]
68	Er	1,75[1]	(+3) 0,85[1]
69	Tm	1,74[1]	(+3) 0,85[1]
70	Yb	1,93[1]	(+3) 0,81[1]
71	Lu	1,74[1]	(+3) 0,80[1]
72	Hf	1,59[1]	(+4) 0,82[1]
73	Ta	1,46[1]	(+5) 0,66[1]
74	W	1,40[1]	(+4) 0,68[1]; (+6)0,65[1]
75	Re	1,37[1]	(+6) 0,52[1]
76	Os	1,35[1]	(+4) 0,65[1]
77	Ir	1,35[1]	(+4) 0,65[1]
78	Pt	1,38[1]; 1,8[2]	(+4) 0,64[1]
79	Au	1,44[1]; 1,8[2]	(+1) 1,37[1]
80	Hg	1,60[1]; 1,8[2]	(+2) 1,12[1]
81	Tl	1,71[1]	(+1) 1,36[1]; (+3)1,05[1]
82	Pb	1,75[1]	(+2) 1,26[1]; (+4)0,76[1]
83	Bi	1,82[1]	(+3)1,20[1]; (+5)0,74[1]; (-3) 2,13[1]
87	Fr	2,80[1]	
88	Ra	2,35[1]	(+2) 1,44[1]
89	Ac	2,03[1]	(+3) 1,11[1]
90	Th	1,80[1]	(+3) 1,08[1]; (+4)0,95[1]
91	Pa	1,62[1]	(+3) 1,06[1]; (+4)0,91[1]
92	U	1,53[1]	(+3) 1,04[1]; (+4)0,89[1]
93	Np	1,50[1]	(+3) 1,02[1]; (+4)0,88[1]
94	Pu	1,62[1]	(+3) 1,01[1]; (+4)0,86[1]
95	Am	—	(+3) 1,00[1]; (+4)0,85[1]

Таблица 18.2

Диаметры молекул [2, 3]

Молекула	Диаметр молекулы, Å	Молекула	Диаметр молекулы, Å
H ₂	2,5—2,77	NO	3,4
H ₂ O	3,50	N ₂ O	4,0
N ₂	3,5	NH ₃	3,0
O ₂	2,94—3,56	CH ₄	3,24—4,30
CO	3,17—3,79	Cl ₂	3,55—5,86
CO ₂	3,24—4,54		

Таблица 18.3

Радиусы многоатомных ионов в растворах [4]

Ион	Радиус, Å	Ион	Радиус, Å
H_3O^+	1,35	NO_3^-	1,89
CN^-	1,92	OH^-	1,53
ClO_4^-	2,36	SCN^-	1,95
HCOO^-	1,58	SH^-	2,00
MnO_4^-	2,40	SO_4^{2-}	2,30
NH_4^+	1,43		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник химика. Под ред. Б. П. Никольского. Т. 1. Изд. 3-е. Л., «Химия», 1971.
2. Аллен К. У. Астрофизические величины. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
3. Кэ́й Дж., Лэ́би Т. Таблицы физических и химических величин. Пер. с англ. Под ред. К. П. Яковлева. М., Физматгиз, 1962.
4. Краткий справочник по химии. Под ред. О. Д. Куриленко. Киев, «Наукова думка», 1965.
5. Мелвин-Хьюз Э. А. Физическая химия. Т. 1. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
6. Дей М. К., Селбин Д. Теоретическая неорганическая химия. Пер. с англ. М., «Химия», 1969.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

19.1. ВВЕДЕНИЕ

Высокая проводимость металлов связана с особенностью их электронного спектра, в котором непосредственно над заполненными уровнями находятся уровни свободные. На рис. 19.1 показаны различные схемы

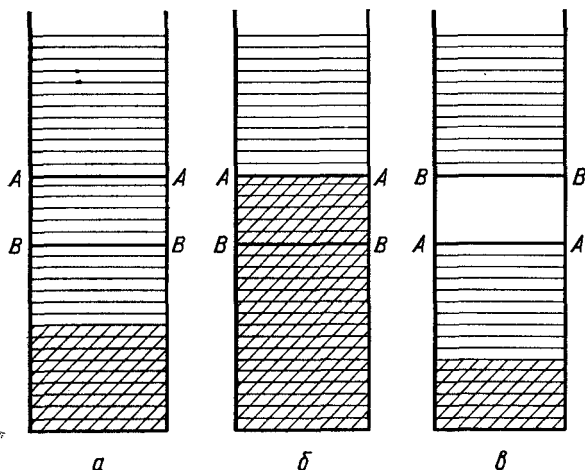


Рис. 19.1. Схема зон для металлов:

a, в — проводимость обусловлена неполным заполнением первой зоны; *б* — проводимость обусловлена перекрытием полностью заполненной первой и второй зон [1]; *AA* — верхняя граница первой зоны; *BB* — дно второй зоны; горизонтальные линии — допустимые электронные уровни; штриховые — область заполненных уровней.

энергетических зон, приводящие к проводимости металла за счет неполного заполнения нижней зоны или перекрытия зон.

Основные механизмы, приводящие к появлению конечного сопротивления металлов, таковы: 1) взаимодействие электронов с фононами; 2) столкновения электронов друг с другом; 3) взаимодействие электронов с примесными атомами и другими статическими дефектами кристаллической решетки. В магнитных металлах воз-

можно также дополнительное взаимодействие электронов (например, со спиновыми волнами). Первые два из перечисленных механизмов имеют место в идеальном кристалле и обуславливают так называемое идеальное сопротивление, которое обращается в нуль при $T = 0$. Третий механизм является причиной остаточного сопротивления, которое может быть существенно различно для различных образцов одного и того же металла.

При достаточно высоких (по сравнению с температурой Дебая) температурах сопротивление определяется, как правило, фоновым механизмом и увеличивается линейно с повышением температуры. В то же время целый ряд сплавов имеют весьма низкий или даже отрицательный температурный коэффициент сопротивления.

Сопротивление металла при плавлении возрастает, если его плотность уменьшается, и (в редких случаях) падает, если плотность металла при плавлении увеличивается.

При низких температурах поведение сопротивления металлов весьма сложно. У некоторых металлов и сплавов обнаруживается явление сверхпроводимости.

В этом разделе значительное место занимают металлы и сплавы, находящие широкое применение. В некоторых случаях для этих материалов приводятся также и неэлектрические свойства, связанные с их электротехническим применением. По той же причине включен в эту главу графит.

19.2. ЧИСТЫЕ МЕТАЛЛЫ

В табл. 19.1 представлены значения удельного сопротивления и температурного коэффициента сопротивления чистых металлов, а также, в некоторых случаях, отношение удельного сопротивления при температуре жидкого гелия к удельному сопротивлению при нормальных условиях, $\rho_{4,2^\circ\text{K}}/\rho_{273^\circ\text{K}}$, характеризующее достигнутую степень чистоты материала. В тех случаях, когда для данного металла приводятся более подробные данные, соответствующее указание дается в первом столбце таблицы. Металлы в таблице расположены в порядке возрастания массового числа.

В тех многочисленных случаях, когда данные различных авторов несколько отличались друг от друга, в таблицу включались только результаты, кажущиеся наиболее достоверными.

Таблица 19.1

Продолжение табл. 19.1

Удельное сопротивление чистых металлов

Металл	$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, 10^{-8} \text{ ом}\cdot\text{см}$	$\frac{d\rho}{dT}, 10^{-3} \text{ град}^{-1}$	$\rho_{4,2^\circ\text{K}}$ $\rho_{273^\circ\text{K}}$	Литература
Литий	-187 0 99,3 230 (ж.)	1,34 8,5 12,7 45,2	— 4,37 — 2,7	— — — —	[2] [4] [2] [2]
Бериллий (см. рис. 19.7 и табл. 19.2)	0	2,78	7,5	—	[4]
Графит (см. рис. 19.8, 19.9)	0 500 1000 2000 2500	800 830 870 1000 1100	— — — — —	— — — — —	[2] [2] [2] [2] [2]
Натрий (см. рис. 19.2 и табл. 19.3)	0 20 97,83(ж.) 97,83(ж.)	4,27 4,2 6,75 9,60	5,5 5,0 — —	— — — —	[4] [3] [8] [8]
Магний (см. табл. 19.2)	0 20	3,94 4,4	4,2 4,2	— —	[4] [3]
Алюминий (см. рис. 19.10, 19.11)	-189 -100 0 20 100 400	0,64 1,53 2,50 2,69 3,86 8,0	— — 4,67 4,2 — —	0,0065 — — — — —	[2, 4] [2] [4] [3] [2] [2]
Калий (см. рис. 19.2 и табл. 19.3)	0 64 (ж.) 350 (ж.)	6,15 13,46 31,4	5,8 — —	— — —	[3] [8] [8]
Кальций	0 20	3,6 4,1	4 4,6	— —	[4] [3]
Титан	0 20	42 55	5,5 3,5	0,215 —	[4] [3]
Ванадий	0 20	18,2 26	— 2,8	— —	[4] [3]
Хром	0 20	1,5 18,9	— 5,88	— —	[4] [3]
Марганец	0(а) 0(б)	710 91	0,17 1,4	— —	[4] [4]
Железо (см. рис. 19.12, 19.24)	-252,7 -205,3 -192,5 -100 0(а) 20 100 200	0,011 0,652 0,844 5,92 8,71 9,71 16,61 24,50	— — — — 6,57 6,51 6,8 —	0,00126 — — — — — — —	[2] [2] [2] [2] [4] [3] [2] [2]
Кобальт	400 0(а) 20 0—100	43,29 5,2 6,24 —	— 6,58 6,04 6,58	— — — —	[2] [4] [3] [2]

Металл	$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, 10^{-8} \text{ ом}\cdot\text{см}$	$\frac{d\rho}{dT}, 10^{-3} \text{ град}^{-1}$	$\rho_{4,2^\circ\text{K}}$ $\rho_{273^\circ\text{K}}$	Литература
Никель (см. рис. 19.13—19.15, 19.23)	-182,5 -78,2 0 20 100 400	1,44 4,31 6,141 6,844 10,327 60,2	— — 6,00 6,00 4,3 —	— — — — — —	[2]* [2]* [2] [2] [2] [2]*
Медь (см. рис. 19.16—19.18, 19.23)	-258,6 -206,6 -150 100 0 20 100 200 500 1000 1500(ж.)	0,014 0,163 0,567 0,904 1,55 1,673 2,28 2,96 5,08 9,42 24,62	— — — — 4,33 4,30 — — — — —	0,09 — — — — — — — — — —	[2] [2] [2] [2] [4] [3] [2] [2] [2] [2] [2]
Цинк (см. табл. 19.2)	-183 -78 0 20 92,5 191,5 300 427(ж.) 500 600 700 800 850	1,62 3,34 5,45 5,92 8,0 10,37 13,25 37,3 36,6 35,9 35,6 35,6 35,74	— — 4,2 4,2 — — — — — — — — —	0,2351 — — — — — — — — — — — —	[2, 2, 4] [2] [4] [3] [2] [2] [2] [2] [2] [2] [2] [2] [2]
Галлий (см. табл. 19.2)	0 20(лоси с) 20(лоси а) 20(лоси b)	13,7 54,3 17,4 8,1	— — — —	0,0025 — — —	[4] [3] [3] [3]
Мышьяк	0 20	26 35	— —	— —	[4] [3]
Рубидий	-190 0 35 40(ж.)	2,5 11,6 13,4 19,6	— 5,3 — —	— — — —	[2] [4] [2] [2]
Стронций	0(а)	20	5,0	—	[4]
Иттрий	20 25	22,76 64,9	— —	— —	[3] [19]
Цирконий	0	40,5	4,0	0,0421	[4]
Ниобий	0 18	23,3 13,1	2,28 3,95	— —	[4] [3]
Молибден (см. табл. 19.11)	0 127 1127 1727 2327	5,03 10,36 44,6 69,6 91,8	4,7 — — — —	— — — — —	[4] [7] [7] [7] [7]
Рутений	0 25 100	6,83 7,427 9,26	3,59 — —	— — —	[9] [9] [9]

Металл	T, °C	ρ , 10^{-8} ом·см	$-\frac{d\rho}{\rho} \frac{dT}{dT}$, 10^{-3} град $^{-1}$	$\rho_{4,2^\circ K}$ $\rho_{273^\circ K}$	Литература
Родий	-160	0,70	—	—	[9]
	-78	3,1	—	—	[9]
	0	4,3	4,57	—	[9]
	25	4,9	—	—	[9]
	100	6,26	—	—	[9]
	200	8,2	—	—	[9]
	300	10,3	—	—	[9]
Палладий (см. табл. 19.7)	400	12,5	—	—	[9]
	500	14,7	—	—	[9]
	-258	0,09503	—	0,0105	[9]
	-78	7,048	—	—	[9]
	0	9,1	3,79	—	[9]
	100	14,0	—	—	[9]
	200	17,4	—	—	[9]
Серебро (см. рис. 19.19 и табл. 19.10)	400	24,3	—	—	[9]
	1400	49,5	—	—	[9]
	-258	0,00793	—	0,0054	[9]
	-78	1,04	—	—	[9]
	0	1,468	4,033	—	[9]
Кадмий (см. табл. 19.2)	100	2,0696	—	—	[9]
	200	2,6854	—	—	[9]
	400	3,979	—	—	[9]
	-252,9	0,17	—	$1,9 \cdot 10^{-4}$	[2, 4]
	-200	1,66	—	—	[2]
	-100	4,8	—	—	[2]
	0	6,73	4,26	—	[4]
Индий	20	7,4	4,3	—	[3]
	100	9,82	—	—	[2]*
	300	16,50	—	—	[2]
	400(ж.)	33,70	—	—	[2]
	500	35,12	—	—	[2]
	700	35,78	—	—	[2]
	0	8,2	5,1	0,0039	[4]
Олово (см. табл. 19.2)	-184	3,4	—	0,00079	[2, 4]
	-78	8,8	—	—	[2]
	0	10,1	4,63	—	[4]
	20	12,8	4,2	—	[3]
	91,45	18,2	—	—	[2]
	200	20,3	—	—	[2]
	225	22,0	—	—	[2]
	235(ж.)	47,6	—	—	[2]
	750	61,22	—	—	[2]
Сурьма (см. табл. 19.2)	-190	10,5	—	—	[2]
	0	32,1	5,1	—	[4]
	20	41,7	—	—	[2]
	860(ж.)	120	—	—	[2]
	19,6	$2 \cdot 10^6$	—	—	[2]
Теллур	19,6	$2 \cdot 10^6$	—	—	[2]
Цезий	-187	5,25	—	—	[2]
	0	19	5,0	—	[2, 4]
	20	21	4,8	—	[2]*
	27	22,2	—	—	[2]
Барий	30(ж.)	36,6	—	—	[2]
	0	36	6,1	—	[4]
	20	50	—	—	[3]

Металл	T, °C	ρ , 10^{-8} ом·см	$-\frac{d\rho}{\rho} \frac{dT}{dT}$, 10^{-3} град $^{-1}$	$\rho_{4,2^\circ K}$ $\rho_{273^\circ K}$	Литература
Лантан	25(α)	56,8	—	—	[19]
	560(β)	98	—	—	[19]
	890(γ)	126	—	—	[19]
Церий	-249(α)	34	—	—	[19]
	25(γ)	75,3	—	—	[19]
	770(δ)	123	—	—	[19]
Празеодим	25(α)	68	—	—	[19]
	820(β)	137	—	—	[19]
Неодим	25(α)	64,3	—	—	[19]
	890(β)	137	—	—	[19]
Самарий	25(α)	88	—	—	[19]
Европий	25	81,3	—	—	[19]
Гадолиний	25(α)	140,5	—	—	[19]
Диспрозий	25	56	—	—	[19]
Гольмий	25	87	—	—	[19]
Эрбий	25	107	—	—	[19]
Тулий	25	79	—	—	[19]
Иттербий	25(α)	27	—	—	[19]
Лютеций	25	79	—	—	[19]
Гафний (см. табл. 19.2)	0	26,5	4,4	0,0947	[4]
Тантал	0	12,4	3,6	—	[4]
Вольфрам (см. табл. 19.2, 19.13, 19.15, 19.16)	-183 (ось [100])	0,892	—	—	[6]
	-183 (ось [111])	0,848	—	—	[6]
	-78,5 (ось [100])	3,22	—	—	[6]
	-78,5 (ось [111])	3,17	—	—	[6]
	0	4,89	4,83	—	[4]
	20	5,5	4,6	—	[3]
	600	16,85	—	—	[6]
	1000	31,74	—	—	[6]
	1500	51,4	—	—	[6]
Рений (см. табл. 19.14— 19.16)	2000	72,19	—	—	[6]
	2500	94,13	—	—	[6]
	3000	117,2	—	—	[6]
	3500	131,4	—	—	[6]
	0	18,9	3,1	—	[4]
Осмий	0	8,75	4,2	—	[9]
	20	9,5	4,2	—	[3]
	25	9,66	—	—	[9]
	100	12,43	—	—	[9]

Металл	T, °C	$\rho, 10^{-8} \text{ ом}\cdot\text{см}$	$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}, 10^{-8} \text{ град}^{-1}$	$\frac{\rho_{4,2^\circ\text{K}}}{\rho_{273^\circ\text{K}}}$	Литература
Иридий	—192	1,375	—	—	[9]
	—78	4,232	—	—	[9]
	0	4,85	—	—	[9]
	20	5,3	4,9	—	[3]
	100	6,75	—	—	[9]
	200	8,71	—	—	[9]
	300	10,72	—	—	[9]
	400	12,76	—	—	[9]
	500	14,89	—	—	[9]
Платина (см. табл. 19.18)	—258	0,0618	—	0,0063	[9]
	—78	6,7297	—	—	[9]
	0	9,81	3,927	—	[9, 4]
	100	13,65	—	—	[9]
	200	17,38	—	—	[9]
	400	24,50	—	—	[9]
	800	37,34	—	—	[9]
	1200	48,34	—	—	[9]
	1500	55,38	—	—	[9]
Золото	—258	0,014	—	0,0068	[9]
	—192	0,4904	—	—	[9]
	—78	1,4392	—	—	[9]
	0	2,065	4,5	—	[9]
	100	2,8873	—	—	[9]
	200	3,735	—	—	[9]
	300	4,615	—	—	[9]
	400	5,534	—	—	[9]
	500	6,62	—	—	[9]
	1000	12,54	—	—	[9]
Ртуть (см. табл. 19.2, 19.3)	1500(ж.)	37,0	—	—	[9]
	—258	0,0188	0,002	—	[4]
	—183,5	6,97	—	—	[2]
	—50,3	12,3	—	—	[2]
	—45,5	21,2	—	—	[4]
	—39,2	25,5	—	—	[2]
	—36,1(ж.)	80,6	—	—	[2]
	0	94,7	—	—	[2]
	20	95,8	0,89	—	[2, 3]
	50	98,5	—	—	[2]
	100	103,25	—	—	[2]
	200	114,27	—	—	[2]
	300	127,0	—	—	[2]
	350	135,5	—	—	[2]

Металл	T, °C	$\rho, 10^{-8} \text{ ом}\cdot\text{см}$	$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}, 10^{-8} \text{ град}^{-1}$	$\frac{\rho_{4,2^\circ\text{K}}}{\rho_{273^\circ\text{K}}}$	Литература
Таллий	—183	4,08	—	—	[2]*
	—78	11,8	—	—	[2]
	0	17,6	—	—	[2]
	0	15	5,2	—	[4, 3]
Свинец	—252,9	0,59	—	—	[2]
	—203	4,42	—	—	[2]
	—192,8	5,22	—	—	[2]
	—103	11,8	—	—	[2]
	0	19,3	4,22	—	[4]
	20	20,6	3,36	—	[3]
	100	27,8	—	—	[2]
	200	38,0	—	—	[2]
	319	50	—	—	[2]
	333(ж.)	95,0	—	—	[2]
Висмут (см. табл. 19.2)	400	98,3	—	—	[2]
	600	107,2	—	—	[2]
	800	116,2	—	—	[2]
	—200	34,8	—	—	[2]
	—100	75,6	—	—	[2]
	0	107	4,45	—	[4]
	20	116	4,2	—	[3]
	100	156,5	—	—	[2]
	200	214	—	—	[2]
	300(ж.)	128,9	—	—	[2]
Торий	500	139,9	—	—	[2]
	700	150,8	—	—	[2]
	0	19,1	3,3	0,017	[4]
	20	18,62	2,3	—	[3]
Уран (см. рис. 19.20 и табл. 19.19)	20—1800	—	2,1	—	[2]
	20	29	3,4	0,5445	[3]
	0	160	—2,97	—	[4]

* Работа [2]*, изд. 1946 г.

Удельное сопротивление для анизотропных металлических кристаллов [4,6]

Металл	$T, ^\circ\text{C}$	Кристаллическая структура	$\rho_{\parallel} \cdot 10^{-6} \text{ ом}\cdot\text{см}$	$\rho_{\perp} \cdot 10^{-6} \text{ ом}\cdot\text{см}$	$\frac{\rho_{\perp}}{\rho_{\parallel}}$
Бериллий	0	Гексагональная	3,58	3,12	0,88
Магний	0	»	3,5	4,22	1,21
Цинк	0	»	5,59	5,39	0,96
Галлий	20	Ромбическая	55,5	17,3	0,31
Мышьяк	0	Гексагональная	26	23,8	0,92
Кадмий	0	»	7,73	6,35	0,87
Олово	0	Тетрагональная	9,09	13,08	1,46
Сурьма	0	Ромбическая	26,3	36,0	1,37
Гафний	0	Гексагональная	32,7	32,0	0,98
Вольфрам	-183	Кубическая	0,892 (ось [100])	0,843 (ось [111])	0,945
	-78,5	»	3,22 (ось [100])	3,17 (ось [111])	0,985
Ртуть	-45,5	Ромбическая	17,8	23,5	1,32
Висмут	0	»	127	99	0,78

Изменение сопротивления при плавлении

При плавлении проводимость большинства металлов падает; у тех металлов, объем которых уменьшается при плавлении (висмут, сурьма, галлий), проводимость возрастает [1] (см. рис. 19.2, табл. 19.3).

Таблица 19.3

Изменение относительного сопротивления некоторых металлов при плавлении [4]

Металл	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{K}$	$\rho_{\text{ж}}/\rho_{\text{тв}}$
Литий	453	1,68
Натрий	370	1,46
Магний	924	1,63
Алюминий	934	1,82(1,64) [7]
Калий	337	1,55
Железо	1808	1,09
Медь	1357	2,07
Цинк	693	2,11
Галлий	303	0,47 [1]
Рубидий	312	1,61
Серебро	1234	1,9
Кадмий	594	1,89
Индий	388	2,12
Олово	505	2,11
Сурьма	904	0,71
Теллур	722	2,00
Цезий	303	1,66
Золото	1336	2,28
Ртуть	234	3,36
Свинец	601	1,98
Висмут	544	0,47

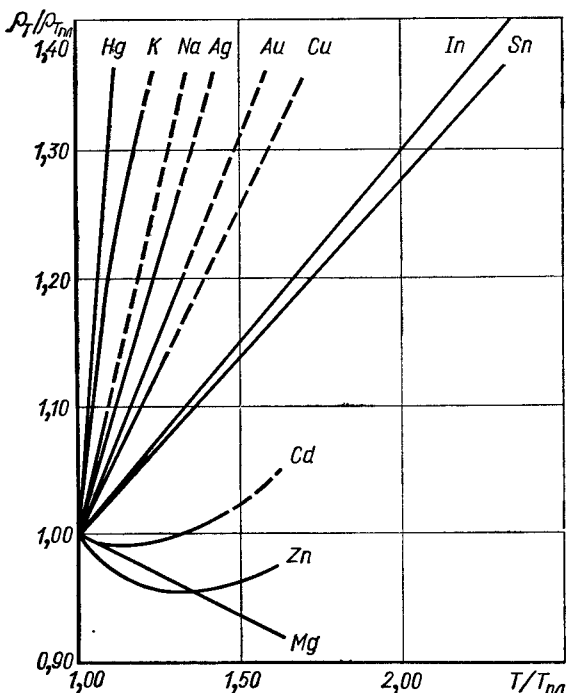


Рис. 19.2. Зависимость относительного удельного сопротивления различных жидких металлов $\rho_T/\rho_{T_{\text{пл}}}$ от $T/T_{\text{пл}}$ [4] (пунктир—экстраполяция).

Проводимость жидких металлов

Натрий [8]

Удельное сопротивление твердого натрия в интервале температур от 20 до 97,83°C дается формулой

$$\rho = (4,477 + 0,1932T - 0,00004T^2) \cdot 10^{-6} \text{ ом}\cdot\text{см};$$

удельное сопротивление жидкого натрия

$$\rho = (6,225 + 0,0345T) \cdot 10^{-6} \text{ ом}\cdot\text{см}.$$

Здесь T — температура, °C.

Таблица 19.4

Удельное сопротивление натрия

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, 10^{-6} \text{ ом}\cdot\text{см}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, 10^{-6} \text{ ом}\cdot\text{см}$
-180	1,0	120	10,365
-75	2,8	140	11,055
0	4,477	180	12,435
20	4,879	200	13,125
40	5,314	260	15,195
60	5,780	300	16,575
80	6,279	360	18,645
97,83 (тв.)	6,750	400	20,025
97,83 (ж.)	9,600		

Калий, сплав натрий — калий

Таблица 19.5

Зависимость удельного сопротивления жидкого калия от температуры

$T, ^\circ\text{C}$	64	100	150	200	250	300	350
$\rho, 10^{-6} \text{ ом}\cdot\text{см}$	13,46	15,49	18,7	21,8	25,0	28,2	31,4

Таблица 19.6

Зависимость удельного сопротивления сплавов натрия и калия, $10^{-6} \text{ ом}\cdot\text{см}$, от температуры

$T, ^\circ\text{C}$	Массовое содержание калия, %		
	56,5	78	80
100	41,61	45,63	—
200	47,23	51,33	41,4
300	54,33	58,58	51,4
400	62,21	65,65	58,8
500	69,37	73,48	67,3
600	78,29	82,61	77,3
700	88,23	91,76	89,3
800	99,68	104,51	—

19.3. ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ПРОВОДИМОСТЬ МЕТАЛЛОВ

Проводимость металлов, как правило, увеличивается при приложении к ним внешнего гидростатического давления. Коэффициент $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp}$ максимален у щелочных металлов, имеющих также и максимальную сжимаемость. Вместе с тем этот коэффициент очень сильно изменяется от элемента к элементу, а зависимость $\rho = f(p)$ в изученном интервале давлений (до 100—120 кбар) далеко не всегда монотонна. У ряда элементов на кривой $\rho = f(p)$ обнаруживаются скачки, используемые в физике высоких давлений в качестве реперных точек давления (табл. 19.7, рис. 19.3).

Таблица 19.7

Значения коэффициента $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp}$, $10^{-6} \text{ см}^2/\text{кг}$, для различных металлов при их гидростатическом сжатии

Металл	$T, ^\circ\text{C}$	Давление, кбар		
		0	10	30
Литий	303	-7,00	-7,52	-9,00
Бериллий	298	1,77	1,63	1,46
Натрий	303	58,8	23,6	4,04
Магний	298	5,40	4,67	3,81
Алюминий	301	4,29	4,06	3,6
Калий	303	134,4	30,0	0,88
Кальций	303	-9,48	-12,2	-20,7
Титан	296	1,19	1,12	1,02
Хром	298	22,2	17,3	8,96
Железо	303	2,42	2,26	1,90
Кобальт	297	0,96	0,90	0,80
Никель	298	1,77	1,82	1,73
Медь	303	1,92	1,80	2,42
Цинк II*	303	9,68	8,76	6,72
Цинк I*	303	5,28	4,40	2,84
Рубидий2*	303	154,0	14,4	-28,8
Стронций	303	-45,6	-59,0	-118,8
Цирконий	299	0,32	0,33	0,22
Ниобий	297	1,40	1,37	1,30
Молибден	300	1,31	1,29	1,24
Родий	299	1,65	1,62	1,56
Палладий	299	2,10	2,04	1,93
Серебро	303	3,48	3,28	2,60
Индий	296	1,25	1,09	0,85
Олово I3*	303	10,0	9,0	6,1
Олово I3*	303	9,24	8,26	5,61
Сурьма4*	303	-9,84	-14,8	-2,80
Барий5*	303	7,2	1,2	-13,6
Церий 6*	297	-4,1	—	1,6
Празеодим	297	1,36	1,20	1,02
Неодим	297	1,57	1,32	1,03
Тантал	302	1,62	1,62	1,55
Вольфрам	302	1,33	1,31	1,25
Ирндий	296	1,39	1,37	1,33
Платина	296	1,92	1,88	1,78
Золото	303	3,02	2,84	2,44
Ртуть (ж.)7*	303	23,1	17,0	—
Ртуть (тв.)	303	—	—	12,0
Свинец	303	13,7	11,6	6,96
Висмут8*	303	-14,8	-18,5	—
Уран	293	4,88	4,56	4,10

* Монокристалл. Угол между главной осью и продольной осью образца 17° для II и 87° для I.

2* Минимум $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$ при $p = 1,5 \cdot 10^4 \text{ кг/см}^2$.

3* Как для Zn, но углы 17° и 82° соответственно.

4* Монокристалл. Угол между главной и продольной осями образца 41° . Максимум $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp}$ при $p = 31 \text{ кбар}$.

5* Скачок $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp}$ при $p = 1,7 \cdot 10^4 \text{ кг/см}^2$.

6* Переход при $(5 \pm 10) \text{ кбар}$, сопровождающийся скачком $\rho(p)/\rho(0)$ от 1,027 до 0,582.

7* Затвердевает при $p = 13,5 \text{ кбар}$.

8* Монокристалл. Угол между главной и продольной осями образца 78° . $\rho(p)/\rho(0)$ уменьшается от 1,5 до 0,24 при $p = 24,7 \text{ кбар}$, затем увеличивается до 0,62 при $p = 26,2 \text{ кбар}$.

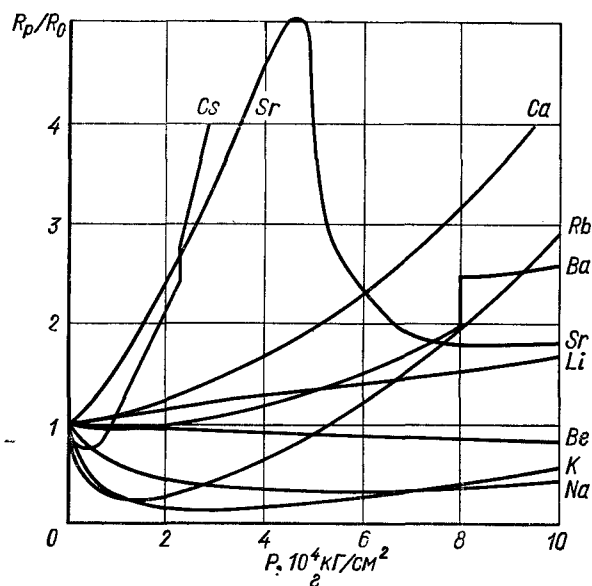
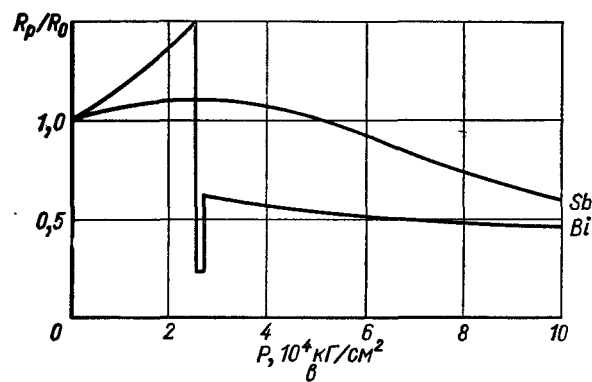
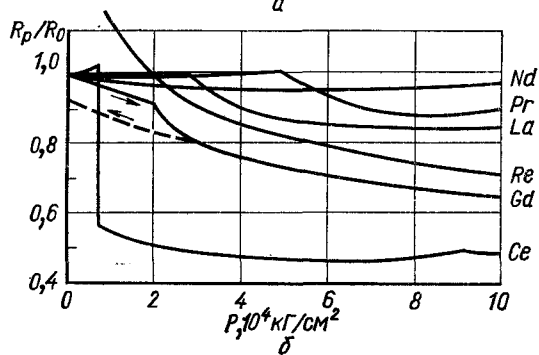
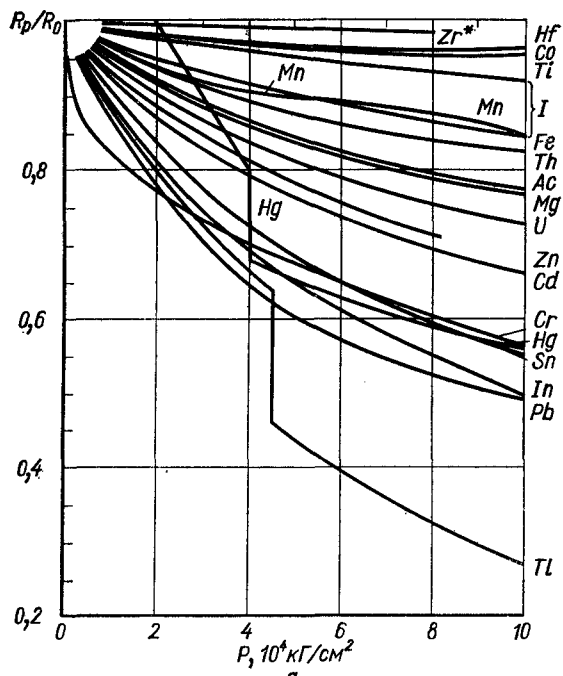


Рис. 19.3. Влияние давления на относительное сопротивление металлов [4].

19.4. СВЕРХПРОВОДНИКИ

Большинство веществ, обладающих свойством сверхпроводимости, является так называемыми сверхпроводниками первого рода или мягкими сверхпроводниками [10]. Слабое магнитное поле в них не проникает за исключением тонкого поверхностного слоя $\sim 1000 \text{ \AA}$. Когда магнитное поле превышает критическое значение (несколько сот гаусс), оно скачком проникает внутрь образца, который теряет сверхпроводимость. Ток в сверхпроводниках первого рода течет лишь по тонкому поверхностному слою.

Для сверхпроводников второго рода характерно то, что магнитный поток проникает в них, образуя множество нитей, пронизывающих диамагнитную сверхпроводящую массу [11].

Для сверхпроводников первого рода в табл. 19.8 (для чистых металлов) и 19.9 (для сплавов и соединений) дана температура перехода в сверхпроводящее состояние. Сверхпроводники второго рода характеризуются прежде всего зависимостью максимальной плотности тока от магнитного поля (при $T = 4,2^\circ \text{ K}$). Эта зависимость кроме состава соединения определяется также и технологией его обработки. На рис. 19.4—19.6 представлен ряд таких зависимостей.

Критическая температура для хорошо изученных сверхпроводников второго рода составляет: Nb_3Sn $18,05^\circ \text{ K}$; сплав $\text{Nb} + 25\% \text{ Zr}$ 11° K ; сплав $\text{Zr} + \text{Ti}$ $\sim 8^\circ \text{ K}$.

Таблица 19.8

Относительное удельное сопротивление при низких температурах и температура перехода в сверхпроводящее состояние T_s для металлов-сверхпроводников [4]

Металл	T , °K	$\rho/\rho_{273^\circ\text{K}}$	T_s , °K
Алюминий	77,7	0,1008	1,14
	20,4	0,0075	—
	4,2	0,0065	—
Титан	77,6	0,318	1,81
	20,5	0,218	—
	4,2	0,215	—
Ванадий	77,6	0,9674	4,3
	20,4	0,9540	—
Цинк	83,7	0,2351	0,79
	20,4	0,0087	—
	4,2	0,0018	—
Галлий	4,2	0,0025	1,07
Цирконий	77,7	0,1971	0,7
	20,5	0,0444	—
	4,2	0,0421	—
Ниобий	77,7	0,499	9,22
	20,3	0,338	—
Технеций *	—	—	8,22
Кадмий	82,5	0,2617	0,54
	20,4	0,0220	—
	4,2	$1,9 \cdot 10^{-4}$	—
Индий	77,8	0,2177	3,37
	20,5	0,1256	—
	4,2	0,0039	—
Олово	80	0,2126	3,69
	20,4	0,0120	—
	4,2	0,00079	—
Лантан	—	—	4,71
Гафний	78,19	0,2626	0,35
	20,3	0,1000	—
	4,2	0,0947	—
Тантал	77,6	0,2037	4,38
	20,4	0,0140	—
	77,6	0,2037	4,38
	20,4	0,0140	—
	4,5	0,0099	—
Рений **	—	—	0,9
Ртуть	77,8	0,2820	4,12
	20,4	0,0642	—
	4,2	0,0020	—
Свинец	73,1	0,2321	7,26
	20,5	0,0301	—

Продолжение табл. 19.8

Металл	T , °K	$\rho/\rho_{273^\circ\text{K}}$	T_s , °K
Висмут **	—	—	4,2
Торий	77,9	0,245	1,32
	20,4	0,031	—
	4,2	0,017	—
Уран	77,8	0,6844	1,2
	20,4	0,5867	—
	4,2	0,5445	—

* По данным [20].

** По данным [7].

* При $p = 24,7$ кбар [21].

Таблица 19.9

Температура перехода в сверхпроводящее состояние T_s для некоторых соединений — сверхпроводников первого рода [4]. Соединения расположены в порядке убывания T_s

Соединение	T_s , °K	Соединение	T_s , °K
NbN	15	Tl ₂ Hg ₅	3,8
NbH	13	PbTi ₂	3,8
NbC	10,5	W ₂ C	2,0—3,5
TaC	9,5	MoC	2,0—3,2
ZrN	9,5	VN	1,5—3,2
MoC	7,6—8,3	ZrB	3
Pb ₅ Na ₂	7,2	Sn ₂ Au	2,5—2,75
Pb ₂ Au	7,0	Sn ₄ Au	2,5—2,75
Tl ₃ Bi ₅	6,4	ZrC	2,3
Tl ₇ Sb ₂	5,2	Au ₂ Bi	1,7
TaSi	4,4	CuS	1,6
WC	2,5—4,2	TiN	1,2
Sn ₂ Sb ₂	4,0	TiC	1
SnSb	3,9		

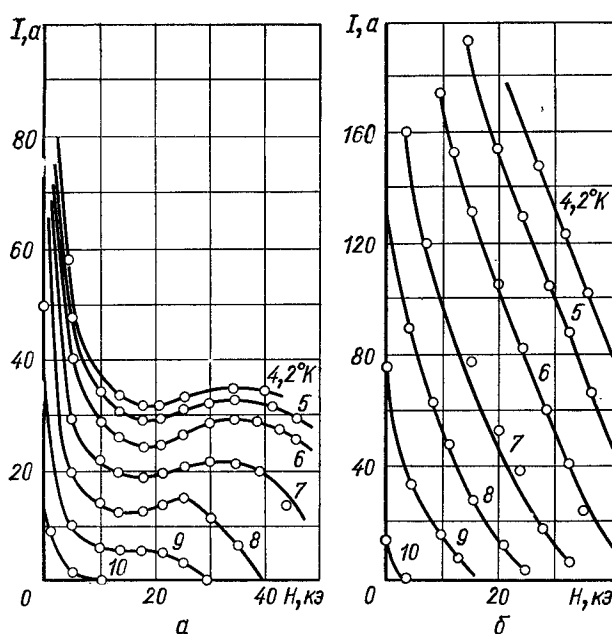


Рис. 19.4. Зависимость критических токов для холоднодеформированного (а) и термобработанного (б) образцов проволоки из сплава Nb + 25% Zr от напряженности магнитного поля и температуры [12].

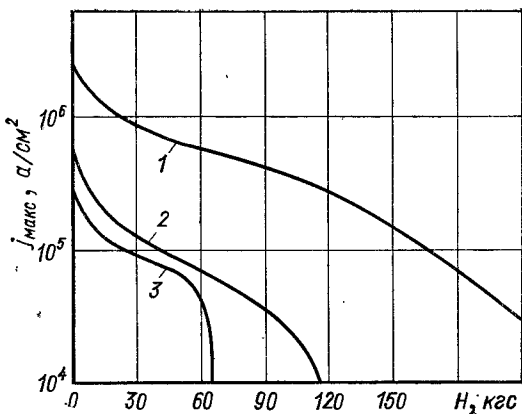


Рис. 19.5. Максимальная плотность тока $j_{\max}$ сверхпроводящих материалов как функция внешнего магнитного поля ($T = 4,2^\circ \text{K}$) [11]:

1 — соединение ниобий — олово; 2 — сплав ниобий — титан; 3 — сплав ниобий — цирконий.

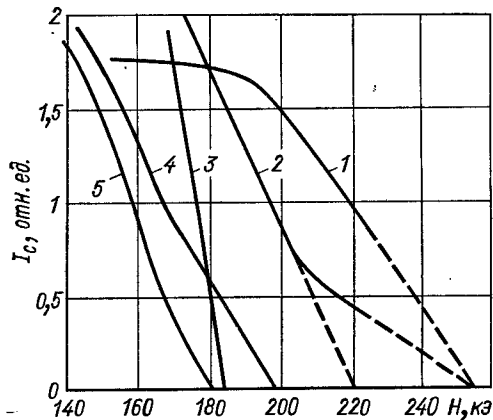


Рис. 19.6. Критические токи некоторых образцов соединений Nb_3Sn и V_3Ga [12]: 1 — Nb_3Sn «многопроволочные» образцы; отжиг при 950°C в течение 20 ч; 2 — то же, при 800°C в течение 20 ч; 3 — V_3Ga , поверхностный слой, отжиг при 1200°C в течение 10 ч; 4 — V_3Ga , «проволока» Кюнцлера, отжиг при 1485°C в течение 2 ч; 5 — то же при 1440°C в течение 2 ч.

19.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ (РИС. 19.7—19.21)

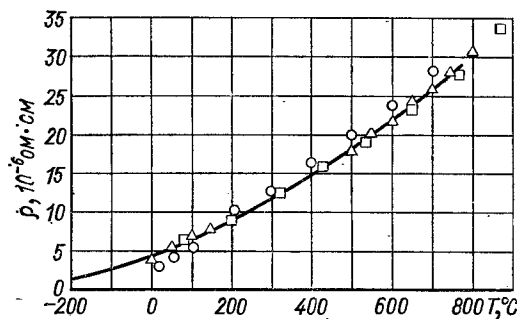


Рис. 19.7. Зависимость удельного сопротивления бериллия от температуры [16].

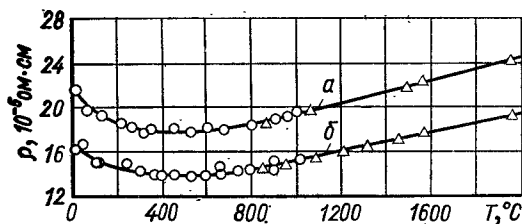


Рис. 19.8. Зависимость удельного сопротивления электродного графита от температуры [18] поперек (а) и вдоль (б) направления прессования.

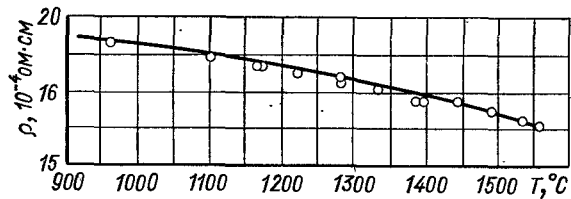


Рис. 19.9. Зависимость удельного сопротивления угольного материала из нефтяного кокса выше температуры отжига от температуры [18].

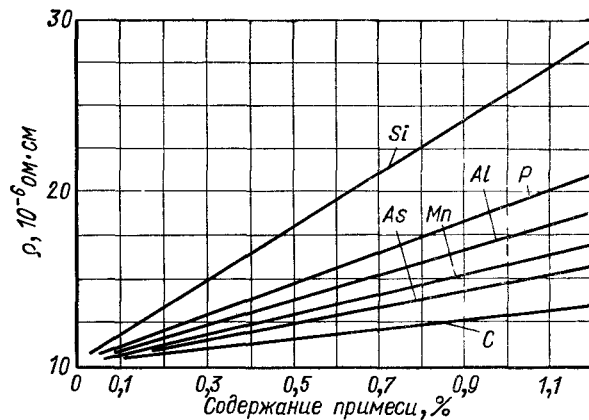


Рис. 19.12. Зависимость удельного сопротивления стали от содержания примесей [7].

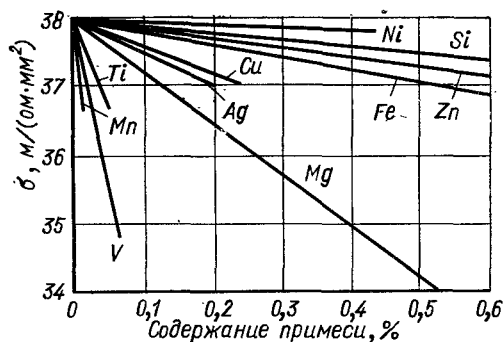


Рис. 19.10. Зависимость проводимости отожженного алюминия от содержания различных примесей [7].

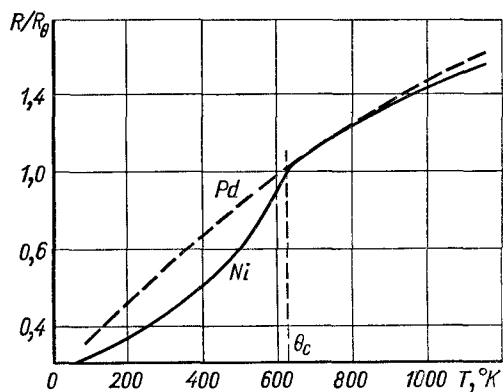


Рис. 19.13. Зависимость относительного сопротивления никеля и палладия от температуры. Сопротивление нормировано на точку Кюри для никеля (631°K) [4].

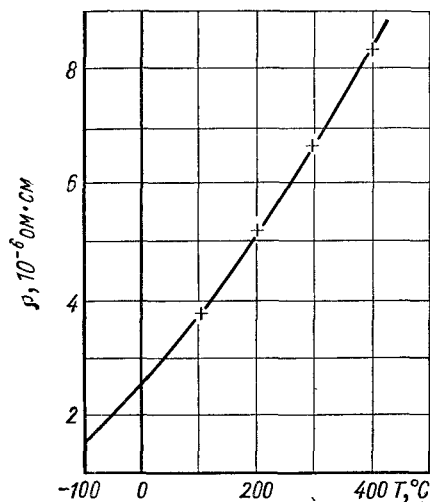


Рис. 19.11. Зависимость удельного сопротивления алюминия от температуры [7].

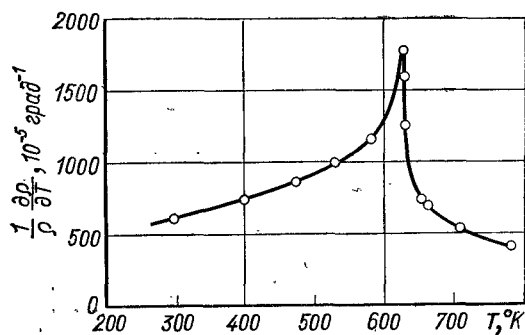


Рис. 19.14. Зависимость температурного коэффициента сопротивления никеля от температуры [4].

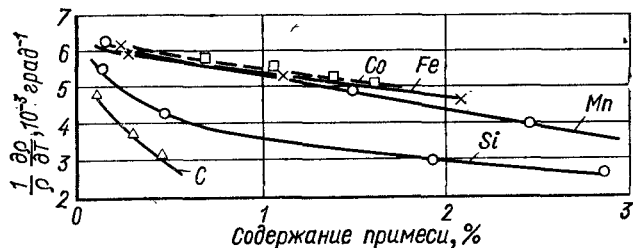


Рис. 19.15. Зависимость температурного коэффициента сопротивления электролитического никеля (содержащего 0,1% Mg) от содержания примесей [7].

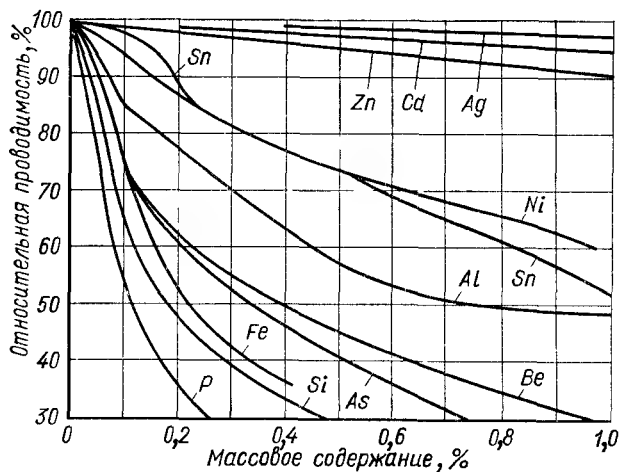


Рис. 19.16. Относительная проводимость бинарных медных сплавов как функция массового содержания второго компонента [7].

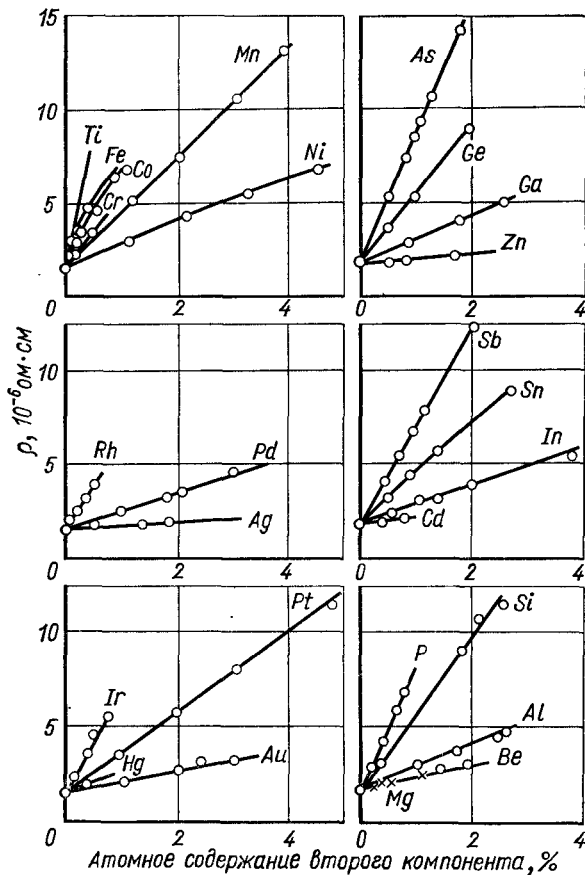


Рис. 19.17. Удельное сопротивление бинарных медных сплавов при 273° К как функция атомного содержания второго компонента [4].

Таблица 19.10

Зависимость удельного сопротивления серебра от температуры [9]

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, 10^{-8} \text{ ом}\cdot\text{см}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, 10^{-8} \text{ ом}\cdot\text{см}$
-258	0,00793	400	3,979
-192	0,304	500	4,651
-160	0,56	1000(ж.)	19,22
-78	1,04	1100	20,48
0	1,468	1200	21,67
10	2,0696	1300	22,79
200	2,6854	1400	23,80
300	3,321		

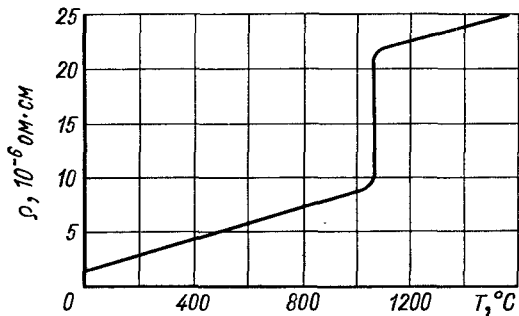


Рис. 19.18. Зависимость удельного сопротивления меди от температуры [7].

Таблица 19.11

Электрические свойства отрезка (длиной 1 см и диаметром 1 см) бесконечной молибденовой нити [7]*

Обозначения: R — сопротивление; W — мощность накала; U — напряжение; I — ток.

$T, ^\circ\text{K}$	$R, 10^{-6} \text{ ом}$	$W, \text{вт}$	$U, 10^{-3} \text{ в}$	$I, \text{а}$
273	6,85	—	—	—
300	7,36	—	—	—
400	10,36	—	—	—
1000	30,4	1,73	7,24	248,5
1200	36,9	4,5	12,9	349,0
1400	44,6	10,0	21,1	473,0
1600	52,4	19,8	32,2	614,0
1800	59,8	35,5	46,1	772,0
2000	69,6	60,3	64,8	816,0
2200	75,4	96,5	85,2	1130,0
2400	83,3	147,8	111,0	1330,0
2600	91,8	218,5	141,4	1547,0
2800	99,8	304,0	174,0	1745,0
2895	103,4	364,4	194,0	1875,0

* Нить бесконечна в смысле отсутствия продольного теплоотвода. При пересчете к диаметру d (см) R делится на d^2 , W умножается на d , U делится на $\sqrt{d}$, I умножается на $\sqrt{d}$.

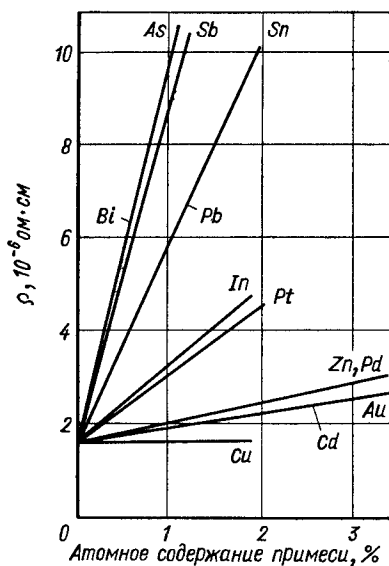


Рис. 19.19. Влияние примесей на удельное сопротивление серебра [7].

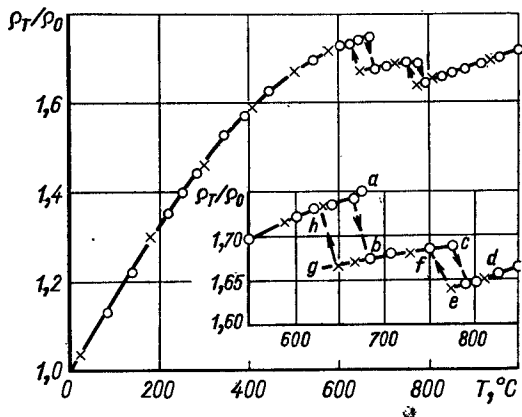


Рис. 19.20. Зависимость относительного удельного сопротивления урана от температуры [15].

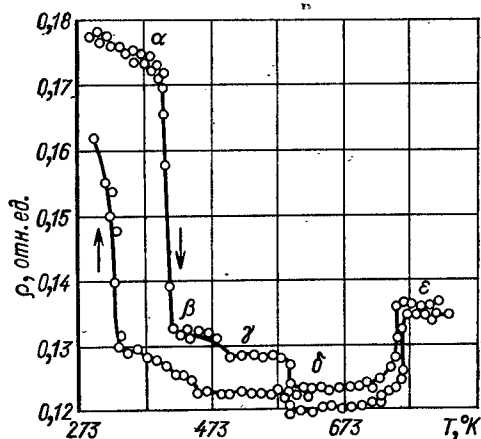


Рис. 19.21. Зависимость сопротивления плутония от температуры [4].

Таблица 19.12

Электрические свойства отрезка (длиной 1 см и диаметром 1 см) бесконечной танталовой нити [7]*

Обозначения: T — истинная температура; R — сопротивление; W — мощность накала; I — ток; I_9 — ток эмиссии.

$T, ^\circ\text{K}$	$R, 10^{-6} \text{ ом}$	$W, \text{вт}$	$U, \text{в}$	$I, \text{а}$	$I_9, \text{а/см}$
300	17,65	—	—	—	—
1000	56,2	2,495	0,0118	211	—
1100	60,2	3,87	0,0152	254	—
1200	64,8	5,78	0,0193	299	—
1300	69,7	8,58	0,0244	352	—
1400	74,0	12,42	0,0304	408	—
1500	79,3	17,2	0,0368	469	—
1600	83,7	23,3	0,0438	528	$4,4 \cdot 10^{-5}$
1700	88,1	31,7	0,0527	602	$3,14 \cdot 10^{-4}$
1800	92,2	41,7	0,0617	676	$1,57 \cdot 10^{-3}$
1900	96,4	53,8	0,0716	751	$6,28 \cdot 10^{-1}$
2000	100,3	68,0	0,0821	828	$2,8 \cdot 10^{-2}$
2100	104,3	85,2	0,0936	910	$8,8 \cdot 10^{-2}$
2200	108,3	107,5	0,1072	1002	$2,7 \cdot 10^{-1}$
2300	112,4	132,9	0,1212	1095	$7,85 \cdot 10^{-1}$
2400	116,2	161,3	0,1357	1189	2,04
2500	120,1	196,2	0,1522	1288	4,4
2600	124,0	236,8	0,1699	1394	—
2700	127,6	282,8	0,1880	1502	—
2800	131,0	332,0	0,2064	1606	—
2900	134,5	387,0	0,2257	1715	—
3000	138,5	454,0	0,2479	1830	—
3100	142,0	526,0	0,2700	1948	—
3200	145,0	611,0	0,2940	2075	—
3269	147,0	674,0	0,3110	2164	—

* См. сноску в табл. 19.11.

Таблица 19.13

Свойства отрезка (длиной 1 см и диаметром 1 см)
бесконечной вольфрамовой нити [6,7]*

Обозначение: $T_{я}$ — яркостная температура (остальные обозначения см. в табл. 19.12)

$T, ^\circ\text{K}$	$T_{я}, ^\circ\text{K}$	$R, 10^{-6} \text{ ом}$	$W, \text{ см}$	$U, 10^{-3} \text{ в}$	$I, \text{ а}$	$I_9, \text{ а/см}^{*2}$
273	—	6,37	—	—	—	—
293	—	6,99	—	—	—	—
300	—	7,20	—	—	—	—
400	—	10,26	0,0062	0,253	24,67	—
500	—	13,45	0,0305	0,64	47,62	—
600	—	16,85	0,0954	1,268	75,25	—
700	—	20,49	0,240	2,218	108,2	—
800	—	24,19	0,530	3,581	148,0	—
900	—	27,94	1,041	5,393	193,1	—
1000	966	31,74	1,891	7,749	244,1	$3,36 \cdot 10^{-15}$
1100	1058	35,58	3,223	10,71	301,0	$4,77 \cdot 10^{-13}$
1200	1149	39,46	5,210	14,34	363,4	$3,06 \cdot 10^{-11}$
1300	1240	43,40	8,060	18,70	430,9	$1,01 \cdot 10^{-9}$
1400	1330	47,37	12,01	23,85	503,5	$2,08 \cdot 10^{-8}$
1500	1420	51,40	17,33	29,85	580,6	$2,87 \cdot 10^{-7}$
1600	1509	55,46	24,32	36,73	662,2	$2,91 \cdot 10^{-6}$
1700	1597	59,58	33,28	44,52	747,3	$2,22 \cdot 10^{-5}$
1800	1684	63,74	44,54	53,28	836,0	$1,4 \cdot 10^{-4}$
1900	1771	67,94	58,45	63,02	927,4	$7,15 \cdot 10^{-4}$
2000	1857	72,19	75,37	73,75	1022	$3,15 \cdot 10^{-3}$
2100	1943	76,49	95,69	85,57	1119	$7,23 \cdot 10^{-2}$
2200	2026	80,83	119,8	98,40	1217	$4,17 \cdot 10^{-2}$
2300	2109	85,22	148,2	112,4	1310	$1,28 \cdot 10^{-1}$
2400	2192	89,65	181,2	127,5	1422	0,364
2500	2274	94,13	219,3	143,6	1526	0,935
2600	2356	98,66	263,0	161,1	1632	2,25
2700	2437	103,22	312,7	179,7	1741	5,12
2800	2516	107,85	368,9	199,5	1849	11,11
2900	2595	112,51	432,4	220,6	1961	22,95

Продолжение табл. 19.13

$T, ^\circ\text{K}$	$T_{я}, ^\circ\text{K}$	$R, 10^{-6} \text{ ом}$	$W, \text{ см}$	$U, 10^{-3} \text{ в}$	$I, \text{ а}$	$I_9, \text{ а/см}^{*2}$
3000	2673	117,21	503,5	243,0	2072	44,4
3100	2750	121,95	583,0	266,7	2187	83,0
3200	2827	126,76	671,5	291,7	2301	150,2
3300	2903	131,60	769,7	318,3	2418	265,2
3400	2978	136,49	878,3	346,2	2537	446,0
3500	3053	141,42	998,0	375,7	2657	732,0
3600	—	146,40	1130	406,7	2777	1173
3655	3165	149,15	1202	423,4	2838	1505

* См. сноску в табл. 19.11.

** I_9 нормировано в таблице на единицу длины нити диаметром 1 см, а не площади.

Таблица 19.14

Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления $\rho^{-1} \partial \rho / \partial T$ рения [17]

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$	$\rho^{-1} \partial \rho / \partial T, 10^{-3} \text{ град}^{-1}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$	$\rho^{-1} \partial \rho / \partial T, 10^{-3} \text{ град}^{-1}$
—253	0,015	—	900	72,5	3,13
—200	2,3	—	1100	80,5	2,94
—100	10	—	1300	87,0	2,78
0	17,5	—	1500	93,0	2,58
20	19,3	—	1700	98,5	2,44
100	25,4	3,95	1900	103,0	2,31
300	40,0	3,83	2100	106,5	2,17
500	52,0	3,58	2300	109,0	2,04
700	63,0	3,33			

Таблица 19.15

Зависимость удельного сопротивления ρ сплавов вольфрама и рения от температуры [17]

Содержание Re в сплаве, %	4,75	$T, ^\circ\text{K}$	300	630	850	1020	1160	1270	1370	1465	1540	—
		$\rho, 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$	10,4	20,4	27,3	32,4	36,7	40,0	43,2	45,9	48,5	—
	21	$T, ^\circ\text{K}$	300	550	810	980	1120	1250	1360	1460	1540	1610
		$\rho, 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$	24,2	34,0	42,0	47,0	51,6	54,6	57,4	59,8	62,6	64,4
	27	$T, ^\circ\text{K}$	1400	1600	1800	2000	2400	2600	2800	3000	—	—
		$\rho, 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$	67,3	73,9	79,9	85,7	91,1	96,8	102,8	109,2	—	—

Таблица 19.16

Зависимость удельного сопротивления ρ сплавов вольфрама и рения при 20°C от содержания Re [17]

Содержание Re в сплаве, %	0	1	3	5	7	10	20
$\rho, 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$	6,7	7,7	9,7	12,7	14,0	18,8	25,0

Таблица 19.17

Зависимость удельного сопротивления ρ палладия от температуры [9]

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$
—258	0,09503	500	27,4
—192	2,0131	600	30,4
—78	7,048	700	33,2
0	9,1	800	35,6
100	14,0	900	37,9
200	17,4	1000	40,0
300	21,0	1200	44,8
400	24,3	1400	49,5

Химический состав и назначение электротехнических сплавов [7,22]

Название сплава	Марка	Химический состав, %	Назначение
Алюмель	НМцАК2-2-1	Мп 1,8—2,2; Al 1,8—2,5 Si 0,85—2; Ni + Co — остальное	Для термопар
Хромель Т	НХ 9,5	Cr 9—10; Ni + Co — остальное	» »
Хромель К	НХ 9	Cr 8,5—9,5; Ni + Co — остальное	Для компенсационных проводов
Копель	МнМц 43-0,5	Ni + Co 42,5—44; Мп 0,1—1; Cu — остальное	Для термопар и компенсационных проводов
Константан	МнМц 40—1,5	Ni + Co 39—41; Мп 1—2; Cu — остальное	Для электротехнических целей

Таблица 19.18

Зависимость удельного сопротивления платины от температуры [5, 9]

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$
—258	0,0618	700	34,30
—192	2,0902	800	37,34
—78	6,7297	900	40,27
0	9,81	1000	43,07
100	13,65	1100	45,76
200	17,38	1200	48,34
300	21,00	1300	50,80
400	24,50	1400	53,15
500	27,88	1500	55,38
600	31,15		

Таблица 19.19

Зависимость относительного удельного сопротивления ρ/ρ_0 урана от температуры [15]*

$T, ^\circ\text{C}$	ρ/ρ_0	$T, ^\circ\text{C}$	ρ/ρ_0
0	1,00	684,1	1,6733
90	1,1307	714,6	1,6790
254,7	1,3966	750,2	1,6821
375	1,5212	776,5	1,6865
447,8	1,6218	800,8	1,6471
602,8	1,7195	852,2	1,6644
667,5	1,7413	958,9	1,6993
		1001,1	1,7189

* Удельное сопротивление отожженного электролитического урана при 0°C $\rho = 26,4 \cdot 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$ [15].

19.6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

Электротехнические сплавы применяются для изготовления образцовых сопротивлений, электротехнических приборов, реостатов, электронагревательных приборов и термопар.

Таблица 19.20

Название сплава	Марка	Химический состав, %	Назначение
Манганин	МиМц 3-12 МнМц АЖЗ-12-0,3-0,3	Мп 11,5 — 13,5; Ni + Co 2,5 — 3,5 Ni 2,5—3,5; Мп 11,5—13,5; Al 0,2—0,4; Рг 0,2—0,5; Cu — остальное	Для измерительных приборов
Нихром	X15 Н60	Ni 55—61; Cr 15 — 18; Fe — остальное	Проволока и лента для нагревательных приборов до 1000 °С
	X20 Н80	Ni 75—78; Cr 20—23	То же до 1100 °С
	X20Н80Т	Ni ≥ 75; Cr 19—23; Ti до 0,4	До 1100 °С
	X20Н80ТЗ	Cr 19—23; Ti 2,0—2,9; Al 0,4—1,1; Ni—остальное	До 1150 °С
Хромоалюминиевый	X13Ю4	Cr 12—15; Al 3,5—5,5; Fe — остальное	Для бытовых приборов и остатков до 850 °С
	ОХ25Ю5	Cr 23—27; Al 4,5—6,5; Fe — остальное	Для нагревательных элементов больших электропечей до 1200 °С

Манганин — основной сплав для изготовления образцовых сопротивлений. Отличается малым (переходящим вблизи 20 °С через 0) температурным коэффициентом сопротивления и малой термо-э. д. с. по отношению к меди. В зависимости от технологии термообработки изготавливается манганин марок ММ и МТ (рис. 19.22) (мягкий и твердый).

лянии между витками вплоть до 500 °С. По состоянию металл бывает мягкий (м.) и твердый (тв.). Плотность константана — 8,9 г/см³, удельное сопротивление 45—52 · 10⁻⁶ ом · см (рис. 19.23).

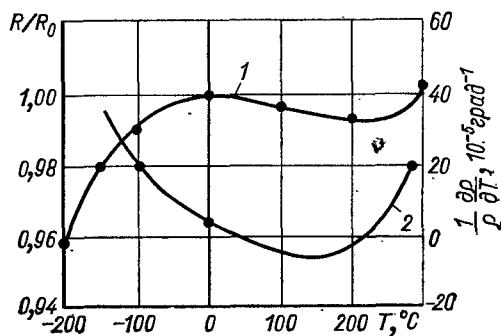


Рис. 19.22. Зависимость относительного сопротивления (1) и температурного коэффициента сопротивления (2) манганина от температуры [7].

Электрические свойства манганина при 20 °С [7]
 Плотность, г/см³ 8,4
 Удельное сопротивление, 10⁻⁶ ом · см . . . 47—48
 Температурный коэффициент удельного сопротивления ± (3—6) · 10⁻⁶
 Термо-э.д.с. относительно меди, мкв/град 1

Константан — медно-никелевый сплав, обладает способностью образовывать прочную оксидную пленку, что позволяет использовать его без специальной изо-

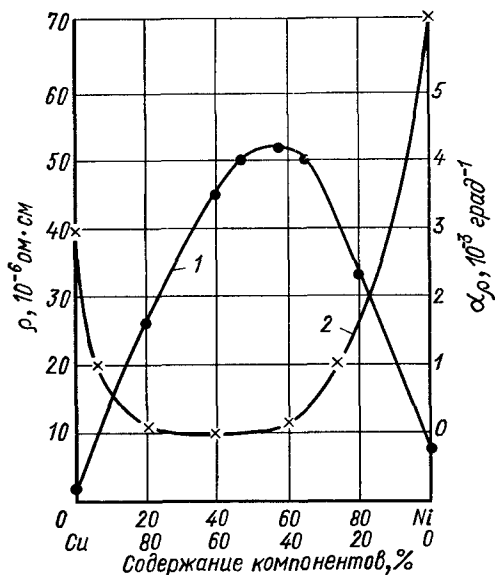


Рис. 19.23. Зависимости удельного сопротивления (1) и температурного коэффициента сопротивления (2) медно-никелевых сплавов от содержания компонентов [7].

Удельное сопротивление проволок из термопарных сплавов при температуре 20 °С, 10^{-6} ом·см

Хромель	66 ± 5
Алюмель	305 ± 45
Копель	465 ± 25

Таблица 19.21

Электрические и тепловые свойства жаростойких сплавов [7]

Сплав	$\rho, 10^{-6}$ ом·см	$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}, \frac{град}{град}$	$\rho_{1000^{\circ}C}$ $\rho_{0^{\circ}C}$	Работоспособность, ч ($\varnothing=0,4$ мм)			
				1000°С	1100°С	1200°С	1300°С
X15H60	110	—	1,10	1000	200	30	—
X20H80	111	—	1,03	—	400	100	10
X20H80T	111	—	1,026	—	—	—	—
X20H80T3	127	—	1,02	—	—	—	—
X13ЮЧ	126	$15 \cdot 10^5$	—	—	—	—	—
ОХ25Ю5	140	$5 \cdot 10^{-5}$	—	—	—	—	—

19.7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ ЖЕЛЕЗА И МЕДИ

Таблица 19.22

Удельное сопротивление чугуна и составляющих его компонентов [14]

Сорт (компонент) чугуна	Чугун			Компонент чугуна			
	Серый	Ковкий	Белый	Феррит	Перлит	Цементит	Графит
$\rho, 10^{-6}$ ом·см	80 ± 40	50 ± 20	70 ± 20	10,4	20	140	150—300

Таблица 19.23

Удельное сопротивление нержавеющей сталей [13]

Марка стали	3X13	X17	1X18H9 2X18H9 1X18H9T	X25C3H	X18H25C2	X20H14C2	X10C2M
$\rho, 10^{-6}$ ом·см	5,7	6,5	7,5	8,0	10,2	9,5	7,5

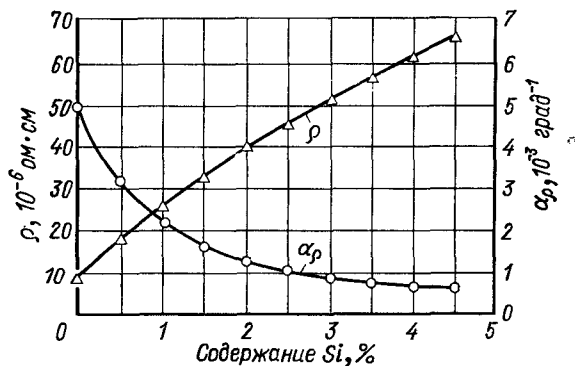


Рис. 19.24. Зависимость удельного сопротивления и температурного коэффициента сопротивления от содержания кремния в электротехнической стали [7].

Таблица 19.24

Проводимость проводниковых бронз [7,22]

Сплав	Состояние	Проводимость, % по отношению к меди
Кадмиевая бронза (0,9% Cd*)	Отожженная	95
	Твердотянутая	83—90
Бронза оловянистая (0,8% Cd, 0,6% Sn)	Отожженная	55—60
	Твердотянутая	50—55
Бронза алюминиевая (2,5% Al, 2% Sn)	Отожженная	15—18
	Твердотянутая	15—18
Бериллиевая бронза (2,25% Be)	Отожженная	17
	Состаренная при 350°С	30
Бронза фосфористая (7% Sn, 0,1% P)	Отожженная	10—15
	Твердотянутая	10—15
Медь хромистая (0,5% Cr)	Состаренная	80—85

* Остальное у всех бронз — медь.

Таблица 19.25

Электрические свойства латуней различных марок [7]

Сплав	Марка, химический состав, % (медь — остальное)	$\rho, 10^{-6}$ ом·см	$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}, 10^{-3} \frac{град}{град}$
Томпак	Л-96, Zn 4	4,3	2,7
Латуни	Л-62, Zn 38	7,1	1,7
Латуни железисто-марганцовистая	ЛЖМц 59-1,1 Fe11, Mn 0,8 Zn 39	8,9	1,8
	ЛМц 58-2 Mn 2; Zn 40	21,2	1,3
Латуни свинцовистая	ЛС 59-1 Pb 1; Zn 40	6,5	1,7

1. Жданов Г. С. Физика твердого тела. М., Изд-во МГУ, 1962.
2. Handbook of Chemistry and Physics. Thirty Sixth ed. 1955.
3. "Metals Reference book". E. J. Smithells. 2nd Ed. V. 2. London, 1955. London, Butterworth, 1955.
4. Handbuch der Physik. Bd XIX. Berlin — Göttingen — Heidelberg, 1956.
5. Головин В. А., Ульянов Э. Х. Свойства благородных металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1964.
6. Смителлс К. Дж. Вольфрам. Пер. с англ. М., Металлургиздат, 1958.
7. Справочник по электротехническим материалам. М. — Л., Госэнергоиздат, 1960.
8. Алабышев А. Ф. и др. Натрий и калий. (Получение, свойства и применение.) Под ред. А. Ф. Алабышева. Л., Госхимиздат, 1959.
9. Кюнцлер Дж. и др. Сверхпроводящие магниты. — «Успехи физ. наук», 1965, т. 86, вып. 1.
10. Сэмпсон У., Крейг П., Строигин М. Успехи в создании сверхпроводящих магнитов. — «Успехи физ. наук», 1967, т. 13, вып. 4.
11. Кремлев М. Г. Сверхпроводящие магниты. — «Успехи физ. наук», 1965, т. 86, вып. 1.
12. Дубров Н. Ф., Лапки Н. И. Электротехнические стали. Госиздат по черной и цветной металлургии. М., 1963.
13. Краткий справочник металлиста. Под ред. проф. А. М. Малова. М., «Машиностроение», 1965.
14. Металловедение и термическая обработка. Под ред. акад. Н. Г. Гудкова. М., «Металлургия», 1966.
15. Стерлин Я. М. Металлургия урана. М., Госатомиздат, 1962.
16. Дарвин Дж., Баддери Дж. Бериллий. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
17. Савицкий Е. М., Тыжнина М. Л., Поварова К. Б. Сплавы рения. М., «Наука», 1965.
18. Техника высоких температур. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
19. Свойства и применение редкоземельных металлов. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
20. «Phys. Rev.», 1961, v. 23, p. 1567.
21. «Philos Mag.», 1953, v. 44, p. 1281.
22. Готмай П. Е., Березин В. Б., Хайкин А. М. Электротехнические материалы. М., «Энергия», 1969.

ГЛАВА 20

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ

20.1. ВВЕДЕНИЕ

Диэлектриками являются неионизованные газы, а также жидкости и твердые тела, характеризующиеся полностью заполненной электронами валентной зоной и полностью свободной зоной проводимости. Если термического возбуждения электронов на уровни зоны проводимости не происходит, то такие вещества ведут себя как изоляторы. При малой энергетической щели ΔE или при большей температуре эти вещества ведут себя как полупроводники. Диэлектрики и полупроводники, в отличие от металлических проводников, экспоненциально уменьшают объемное сопротивление при повышении температуры.

Носителями тока в диэлектриках, находящихся в обычных условиях, чаще всего являются ионы, реже — электроны (n - и p -проводимость). В жидких диэлектриках вклад в проводимость вносят ионы обоих знаков, а в твердых чаще всего преобладает миграция ионов одного знака (катионная или анионная униполярная проводимость). Проводимость газов при обычной температуре зависит от степени их ионизации заряженными частицами или ультрафиолетовыми лучами, не является характеристикой самого вещества и составляет 10^{-19} — 10^{-20} ом⁻¹.см⁻¹.

Пробой диэлектриков носит либо тепловой, либо электрический — лавинный характер. Механизм теплового пробоя — постепенный разогрев участка диэлектрика, падение его сопротивления и термическое разрушение. Развитие теплового пробоя в зависимости от перенапряжения изменяется от нескольких секунд до сотых долей секунды. Электрический пробой является электроннолавинным процессом и происходит за 10^{-6} — 10^{-7} сек. Проводимость и пробивное напряжение диэлектриков сильно зависят от чистоты и структуры вещества. Если у металлов технической чистоты проводимость составляет 80—99% проводимости идеального монокристалла, то у диэлектриков пробивное напряжение и изоляционные свойства составляют обычно не более 10% установленных на совершенных образцах.

Наиболее стабильны по отношению к качеству образца значения диэлектрической проницаемости ϵ .

Диэлектрическая проницаемость связана с тремя эффектами. *Электронная поляризация* — смещение электронных орбит происходит за время $\tau \sim 10^{-15}$ сек и дает основной вклад в ϵ в случае симметричных неполярных молекул. *Ионная поляризация* (у ионных кристаллов) — смещение ионов, составляющих остов кристалла или молекулы; $\tau \approx 10^{-13}$ сек. *Дипольная или ориентационная поляризация* связана с поворотом в электрическом поле молекул, имеющих дипольный момент. Эта поляризация приводит к гораздо большему значению ϵ , однако время, необходимое для ориентации молекул, составляет 10^{-10} — 10^{-3} сек и сильно зависит от свойств, температуры и агрегатного состояния вещества. У веществ, молекулы которых обладают дипольным моментом, ϵ может сильно зависеть от частоты.

В диэлектрике, помещенном в переменное электрическое поле, часть энергии поля переходит в тепловую. Тепловые потери пропорциональны тангенсу угла диэлектрических потерь [4]: $P_{(вт)} = U \omega C \operatorname{tg} \delta$, где U — действующее значение синусоидального напряжения; ω — круговая частота; C — емкость участка изоляции; $\operatorname{tg} \delta = I_{\text{акт}} / I_{\text{реакт}}$ — отношение активного и реактивного токов на участке изоляции.

Диэлектрические потери у веществ, обладающих дипольным моментом, часто оказываются гораздо выше, чем у неполярных диэлектриков. Однако целый ряд полярных диэлектриков сочетает высокие значения ϵ и относительно небольшое значение $\operatorname{tg} \delta$.

20.2. ПРОВОДИМОСТЬ, ПРОБИВНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ И ТАНГЕНС УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

В табл. 20.1 содержатся сведения об электрических свойствах различных диэлектриков. Сведения об удельном сопротивлении и пробивном напряжении почти всецело относятся к применяемым на практике образцам материалов. В особо чистых условиях эксперимента удается получить гораздо более высокие значения пробивных напряжений, однако они получены лишь для небольшого числа материалов [2, 20].

Удельное сопротивление ρ , пробивное напряжение $E_{пр}$, диэлектрическая проницаемость ϵ и тангенс угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg} \delta$) [1,2,4,6—9,21]

Вещество	Химический состав	$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ом}\cdot\text{см}$	$E_{пр}^*, \text{кВ/мм}$	ϵ^{2*}	$\operatorname{tg} \delta$
а) Твердые неорганические вещества						
Алюминия окись	Al_2O_3	20	10^{16}	—	10	$5 \cdot 10^{-4} (10^6 \text{ гц})$
		300	$3 \cdot 10^{13}$	—	—	$15 \cdot 10^{-4} (10^{10} \text{ гц})$
		800	$3,5 \cdot 10^8$	—	—	—
		1100	$1 \cdot 10^6$	—	—	—
Асбест (хризотилловый)	$3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	20	$10^{10}—10^{12}$	—	—	—
Асбестоцемент	46%; цемент 46%; асбест 8%; тальк	20	$10^{10}—10^{12}$	2—3 (20— 150°C)	—	—
Бериллия окись	BeO	600	$4 \cdot 10^8$	—	7,5	$3 \cdot 10^4 (2 \cdot 10^9 \text{ гц})$
		1100	$5 \cdot 10^6$	—	—	—
		2100	10^3	—	—	—
		—	—	—	—	—
Бора нитрид	BN	2000	$1,9 \cdot 10^8$	—	—	—
Калий бромистый	KBr	25	—	$0,85 \cdot 10^5$	4,9	—
		300	$0,5 \cdot 10^9$	—	—	—
		500	$3 \cdot 10^6$	—	—	—
		700	10^4	—	—	—
Калий хлористый	KCl	25	—	$1,2 \cdot 10^5$	4,68	—
		300	$0,5 \cdot 10^9$	—	—	—
		500	$3 \cdot 10^6$	—	—	—
		700	10^4	—	—	—
Кварц плавленный	SiO_2	20	10^{15}	$6,5 \cdot 10^5$	3,75	Меньше
		400	10^{10}	—	3,75	0,003
		600	10^8	—	3,75	90 500°C
		1000	10^6	—	—	—
Керамика конденсатор- ная	Кристаллическая основа					
ТК-20	ZrTiO_4	20	$10^{14}—10^{15}$	32	28—30	$2,5—5,5 \cdot 10^{-4}$
ТК-20-80	ZrTiO_4	20	$10^{14}—10^{15}$	—	30—32	$3,5—6 \cdot 10^{-4}$
T-80	TiO_2	20	$10^{13}—10^{14}$	27	78—88	$4—5,5 \cdot 10^{-4}$
T-150	CaTiO_3	20	$10^{14}—10^{15}$	22	150—165	$2—4 \cdot 10^{-4}$
T-900	$(\text{SrBi}) \text{TiO}_3$	20	$10^{12}—10^{14}$	28	900—1000	$5—10 \cdot 10^{-4}$
СМ-I	$(\text{BaTiO}_3)_{0,9} \cdot (\text{BaZrO}_3)_{0,075}$	20	$10^{11}—10^{13}$	13	2700— 3000	$1—2 \cdot 10^{-2}$

Вещество	Химический состав	$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ом}\cdot\text{см}$	$F_{\text{пр}}^*, \text{кв/мм}$	ϵ^{2*}	$\text{tg } \delta$
Магния окись	MgO	850 2100	$2 \cdot 10^8$ $4,5 \cdot 10^2$	— —	— —	— —
Мрамор	CaCO ₃ или CaCO ₃ ·MgCO ₃	20	10^7 — 10^{11}	2,5	8—10	0,005—0,001
Натрий бромистый	NaBr	25 300 500 700	— $3 \cdot 10^7$ $2 \cdot 10^5$ $2 \cdot 10^3$	$0,98 \cdot 10^5$ — — —	6,1 — — —	— — — —
Натрий хлористый	NaCl	25 300 500 700	— 10^9 $3 \cdot 10^6$ 10^4	$1,56 \cdot 10^5$ — — —	5,9 — — —	— — — —
Слюда мусковит	6SiO ₂ ·3Al ₂ O ₃ ·K ₂ O·2H ₂ O	20	10^{15}	10^5 — 10^6 (эксперимент)	6,8—7,5	0,0002—0,0006
Слюда флогопит	6SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·6MgO·K ₂ O·2H ₂ O	20	10^{13} — 10^{14}	200 (технич.)	5,5	0,0025—0,01
Стеатит (высоковольтный)	тальк—основа; 10% BaCO ₃ ; ~ 7% глина	20 100	10^{15} $5 \cdot 10^{13}$	20—25 —	6—6,5 —	0,002 —
Стекло ЗС-5	68% SiO ₂ ; 20% B ₂ O ₃ ; 4% Na ₂ O; 5% K ₂ O; 3% Al ₂ O ₃	200	$4 \cdot 10^6$	—	—	—
Стекло боросиликатное № 24	31,8% SiO ₂ 12,9 B ₂ O ₃ ; 48% BaO; 2,8 ZnO; 3% Al ₂ O ₃ ; 1,5% — другие окислы	20 200	— $3 \cdot 10^{13}$	— —	8,4 —	0,0009 0,0009
Стекло пирекс натриевый	80% SiO ₂ ; 12% B ₂ O ₃ ; 4,5% Na ₂ O; 0,5% MgO; 2,0% Al ₂ O ₃ ; 1% — другие окислы	20 200	— $2 \cdot 10^8$	— —	5,3 —	0,0035 0,01
Стекло пирекс калиевый	80% SiO ₂ ; 13% B ₂ O ₃ ; 5,5% K ₂ O; 0,5% MgO; 1% — другие окислы	20 200	— $8 \cdot 10^{11}$	— —	5,7 —	0,0018 —

Веществ	Химический состав	$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ом}\cdot\text{см}$	$E_{\text{пр}}^*, \text{кВ/мм}$	ϵ^{2*}	$\text{tg } \delta$
Стекло титановое	14,5% SiO_2 ; 12,5% B_2O_3 ; 2% NaO ; 44% BaO ; 3% Al_2O_3 ; 24% TiO_2	20 200	— $1 \cdot 10^{13}$	— —	11,0 —	0,0012 0,0012
Тальк	$3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	20	$10^8 - 10^9$	1	4—5	—
Тория двуокись	ThO_2	20 550 1200	$4 \cdot 10^{13}$ $2,6 \cdot 10^4$ $1,5 \cdot 10^4$	— — —	17 — —	$1,5 \cdot 10^{-3}$ — —
Циркония двуокись	ZrO_2	385 700 1200 2000	$1 \cdot 10^6$ $2,2 \cdot 10^3$ $3,6 \cdot 10^2$ 10	— — — —	— — — —	— — — —
б) Твердые органические вещества						
Антрацен		17	—	—	3,46	—
Винипласт	Полхлорвинил без пластификатора	20	$10^{14} - 10^{15}$	45	3,1—3,5	0,025—0,04
Воск(пчелиный)	см. [4]	20	$5 - 12 \cdot 10^{13}$	25—30	2,8—2,9	0,02—0,03
Гетинакс	Бакелизированная бумага	20	$10^{10} - 10^{11}$	16—25	7—8	0,045—0,1
Дифенил	$\text{C}_{12}\text{H}_{10}$	17	—	—	2,57	—
Древесина, дуб	Воздушно-сухое состояние $\gamma = 0,87 \text{ г/см}^3$	20	$8 \cdot 10^{10}$	3—5,5	—	—
Сосна	$\gamma = 0,56 \text{ г/см}^3$	20	$8 \cdot 10^{10}$	2,4—4,5	—	—

Вещество	Химический состав	$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ом}\cdot\text{см}$	$E_{\text{пр}}^*, \text{кв/мм}$	ε^{2*}	$\text{tg } \delta$
Канифоль	Основа — абиетиновая кислота $\text{C}_{20}\text{H}_{30}\text{O}_2$ и ее изомеры	20	$10^{15}—10^{16}$	10—15	3	$<0,05$
Каучук (натуральный)	Полимер изопрена $(\text{C}_5\text{H}_8)_n$	20	$5 \cdot 10^{15}—10^{16}$	—	2,3—2,4	0,001—0,003
Нафталин		25	—	—	2,85	—
Парафин	Смесь твердых предельных угле- водородов $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$	20	$10^{15}—10^{17}$	20—30	1,9—2,2	$3,7 \cdot 10^{-4}$
Поливинилхлорид (поли- хлорвинил)	см. [4]	20	$10^{14}—10^{16}$	14—20	3—5	0,03—0,05
Полиметилметакрилат (орг. стекло)	Полимер метакриловой кислоты $\text{CH}_2=\text{C} \begin{cases} \text{CH}_3 \\ \text{COOH} \end{cases}$	20	$10^{14}—10^{16}$	18—35	3,5—4,5 (50 гц) 2,7—3,2 (10^6 гц)	0,04—0,06 (50 гц) 0,02—0,03 (10^6 гц)
Полистирол	$-\text{CH}_2\text{CH}-\text{CH}_2-$  полимер	20	$10^{17}—10^{18}$	20—35	2,45— 2,65	0,0001—0,0008
Политетрафторэтилен (тефлон)	$-\text{CF}_2-\text{CF}_2-$ полимер	20	$10^{15}—10^{16}$	20—30	2	0,0002
Полиэтилен	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ полимер	20	$10^{15}—10^{17}$	18—20	2,3	0,0002
Резина электроизоляци- онная		20	$10^{14}—10^{15}$ (кратковременно)	20—40	2,5—5	0,01—0,03

Вещество	Химический состав	$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ом}\cdot\text{см}$	$E_{\text{пр}}^*, \text{кв/мм}$	ε^*	$\text{tg } \delta$
Резина кремнийорганическая	—	20	10^{14}	20	4	0,008—0,01
Смола эпоксидная	Сополимер двухатомных фенолов и эпихлоргидрина	20	10^{13} — 10^{14}	16	3,7	0,019
Текстолит	Ткань, пропитанная фенолформальдегидной смолой	20	10^9 — 10^{10}	3,5—6	8	0,07 и более
Стеклотекстолит	Стеклоткань, пропитанная фенолформальдегидной смолой	20	10^{12}	10—12	—	0,05—0,06
Фенопласт (пресс-порошок К-211-3)	Резольная смола + молотая слюда и кварц	20	10^{14}	12	7	0,01
К-211-4	Резольная смола + молотая слюда, кварц и древесная мука	20	10^{13}	12	6	0,02
К-211-34	Близок к К-211-4	20	10^{14}	12	—	0,01
Церезин	Смесь твердых алифатических углеводородов от $\text{C}_{30}\text{H}_{50}$ до $\text{C}_{53}\text{H}_{108}$	20	10^{16}	15	2,1—2,3	$0,2 \cdot 10^{-4}$
Шеллак	Основа — эфиры алеириновой ($\text{C}_{16}\text{H}_{32}\text{O}_5$) и шеллоновой ($\text{C}_{15}\text{H}_{20}\text{O}_2$) кислот	20	10^{15} — 10^{16}	20—30	3,6	0,01
Эбонит	Каучук + до 40% связанной серы	20	10^{15} — 10^{16}	—	2,7—3,0	0,01—0,015
Янтарь	Ископаемая смола	20	до 10^{10}	—	2,8	0,01

Вещество	Химический состав	$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ом} \cdot \text{см}$	$E_{\text{пр}}^*, \text{кВ/мм}$	ε^{2*}	$\text{tg } \delta$
в) Жидкости [6,4]						
Азот (ж.)	N_2	-198,4	—	—	1,445	—
Аммиак (ж.)	NH_3	-77,7	$1,3 \cdot 10^7$	—	25,0	—
Аргон (ж.)	Ar	-184,4	—	—	1,516	—
Ацетон	$(\text{CH}_3)_2\text{CO}$	-15 25	$1,1 \cdot 10^9$ —	— —	— 20,74	— —
Бензол	C_6H_6	20 25	$1 \cdot 10^{18}$ —	— —	— 2,2747	— —
Бром	Br_2	-17,2	$1,3 \cdot 10^{13}$	—	3,22	—
Вода (перегнанная в вакууме)	H_2O	0 10 18 34 50	$1,58 \cdot 10^8$ $2,85 \cdot 10^8$ $4,44 \cdot 10^8$ $9,62 \cdot 10^8$ $18,9 \cdot 10^8$	— — — — —	— — 78,3(25°) 34,6(208°) 10,1(364°)*	— — — — —
Вода (дистиллированная)	H_2O	20—25	$1—4 \cdot 10^6$	—	—	—
Водород (ж.)	H_2	-252,85	—	—	1,225	—
Водород хлористый (ж.)	HCl	-96 -113,2	$1 \cdot 10^8$ —	— —	— 11,8	— —

* Значения ε при 208 и 364° С на линии насыщения.

Вещество	Химический состав	$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ом}\cdot\text{см}$	$E_{\text{пр}}^*, \text{кВ/мм}$	ϵ^{2*}	$\text{tg } \delta$
Гексан	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}_3$	18	$1 \cdot 10^{18}$	—	—	—
Гелий (ж.)	He	-269,0	—	—	1,048	—
Глицерин	$\text{CHON}(\text{CH}_2\text{OH})_2$	25	$6,4 \cdot 10^8$	—	42,4	—
Кислород (ж.)	O_2	-182,9	—	—	1,463	—
Кислота муравьиная	HCOOH	18	$5,6 \cdot 10^5$	—	57,9	—
Кислота олеиновая	$\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COOH}$	15 21,9	$2 \cdot 10^{10}$ —	— —	— 2,43	— —
Кислота серная	H_2SO_4	25	$1 \cdot 10^2$	—	—	—
Кислота уксусная	CH_3COOH	25	$1,1 \cdot 10^6$	—	6,19	—
Масло касторовое (рициновое)	см. [4]	20 100	$5 \cdot 10^{10}$ — $5 \cdot 10^{12}$ —	14—16 —	4—4,5 3,5—4,0	0,01—0,03 0,2—0,8
Масло кремнийорганическое	Метилполисилоксаны	20	10^{17} — 10^{15}	20—43,5	2,5—3,5	0,0002—0,0005
Масло конденсаторное	Очищенное трансформаторное	20	10^{14}	20	2,1—2,3	0,002—0,005
Масло трансформаторное	Смесь углеводородов	20 60	10^{14} — 10^{16} 10^{13} — 10^{15}	20—25	2,1—2,2	0,01—0,0002
Сероводород (ж.)	H_2S	-61,8	$1 \cdot 10^{11}$	—	8,04	—
Сероуглерод	CS_2	25	—	—	2,625	—
Спирт метиловый	CH_3OH	20	$5,8 \cdot 10^6$	—	37,92(0°)	—
Спирт этиловый	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$	0	$1,5 \cdot 10^7$	—	—	—
		18	$6,4 \cdot 10^8$	—	26,4(10°)	—
		25	$1,3 \cdot 10^9$	—	—	—

Вещество	Химический состав	$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ом}\cdot\text{см}$	$E_{\text{пр}}^*$	ϵ^{2*}	$\text{tg } \delta$
Толуол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$	19,5	$< 1 \cdot 10^{14}$	—	2,435(0°)	—
Фтор (ж.)	F_2	-189,97	—	—	1,517	—
Хлор (ж.)	Cl_2	-70	$1 \cdot 10^{16}$	—	2,048	—
Этиленгликоль	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$	—	—	—	38,7	—
Эфир диэтиловый	$(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$	25	$4 \cdot 10^{13}$	—	4,22	—
г) газы						
Азот	N_2	0	—	1,0	1,00058	—
Аргон	Ar	0	—	0,25	1,000554	—
Вода (пар)	H_2O	110	—	—	1,0126	—
Водород	H_2	0	—	0,6	1,00027	—
Воздух	Смесь	0	—	1,0	1,00057	—
Гелий	He	0	—	0,2	1,000068	—
Дихлордифторметан (фреон-12)	CF_2Cl_2	—	—	2,4—2,6	1,00355	—
Кислород	O_2	0	—	0,9	1,000532	—
Ксенон	Xe	25	—	—	1,000768	—
Неон	Ne	0	—	0,15	1,000127	—
Ртуть	Hg	400	—	—	1,00074	—
Серы гексафторид (элегаз)	SF_6	25	—	2,3—2,5	1,002049	—
Углерода двуокись (уг- лекислый газ)	CO_2	0	—	0,9	1,00099	—

* Пробивное напряжение для газов дается по отношению к воздуху, для которого $E_{\text{пр}} = 32 \text{ кВ/см}$ при $d=1 \text{ см}$ и $p=760 \text{ мм рт. ст.}$

** Значения ϵ для газов соответствуют $p = 760 \text{ мм рт. ст.}$

20.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Слюда [4, 9]

Промышленное значение имеют природные разновидности: мусковит ($\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) и флогопит ($\text{K}_2\text{O} \cdot 6\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), а также фторфлогопит (с заменой групп OH ионами фтора), полученный искусственным путем. Электрические свойства фторфлогопита: $\rho = 10^{17} \div 10^{18} \text{ ом}\cdot\text{см}$, $\text{tg } \delta < 0,0001$ при 10^6 гц . Электрические характеристики природной слюды сильно зависят от ее чистоты.

Пробивное напряжение тонких (10 мкм) листочков мусковита при температуре $-200 \div +200^\circ\text{C}$ достигает 10^6 в/мм (рис. 20.1), у флогопита — $7 \cdot 10^5 \text{ в/мм}$. Пробивное напряжение конденсаторной слюды не ниже:

20—25 мкм — 1500 в; 36—45 мкм — 2500 в;

26—35 мкм — 2000 в; 46 мкм — 3000 в.

Удельное сопротивление конденсаторной слюды $\rho \geq 10^{15} \text{ ом}\cdot\text{см}$, $\epsilon = 6 \div 7,5$; $\text{tg } \delta \leq 0,0006$ при 10^6 гц .

Слюда начинает вспучиваться при температуре 500—600° С.

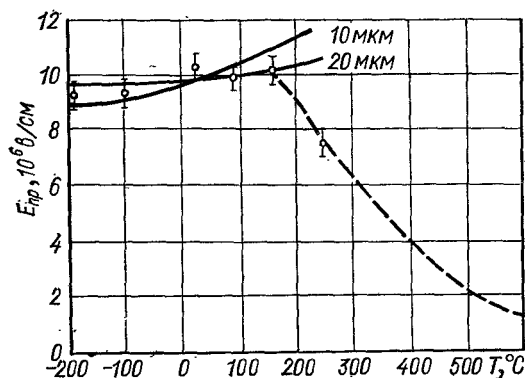


Рис. 20.1. Зависимость пробивного напряжения мусковита от температуры [2]:

сплошная линия — теория для разных толщин образца; пунктир — теория по Фрелиху; точки — эксперимент.

Стекло, кварц [3,4]

В состав стекла входят стеклообразующие окислы (SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 , As_2O_5), окислы-плавни (Na_2O , K_2O , Li_2O , CaO , MgO), а также окислы промежуточного типа (Al_2O_3 , ZnO , PbO , TiO_2). Механизм проводимости стекла обусловлен перемещением слабо связанных ионов, особенно ионов натрия. Неотожженное стекло обладает худшими электрическими характеристиками, чем отожженное (рис. 20.2, 20.3).

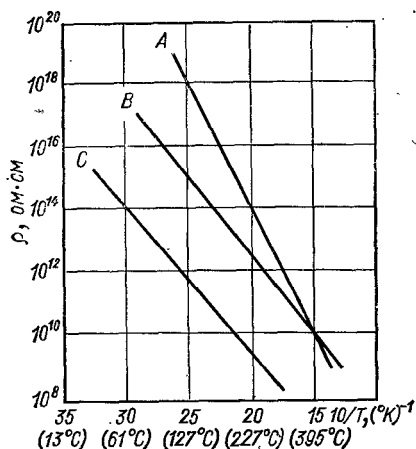


Рис. 20.2. Зависимость удельного сопротивления кварца от температуры [22]:

A — плавный кварц; B — кристалл, $\perp$ главной оси; C — кристалл, $\parallel$ главной оси.

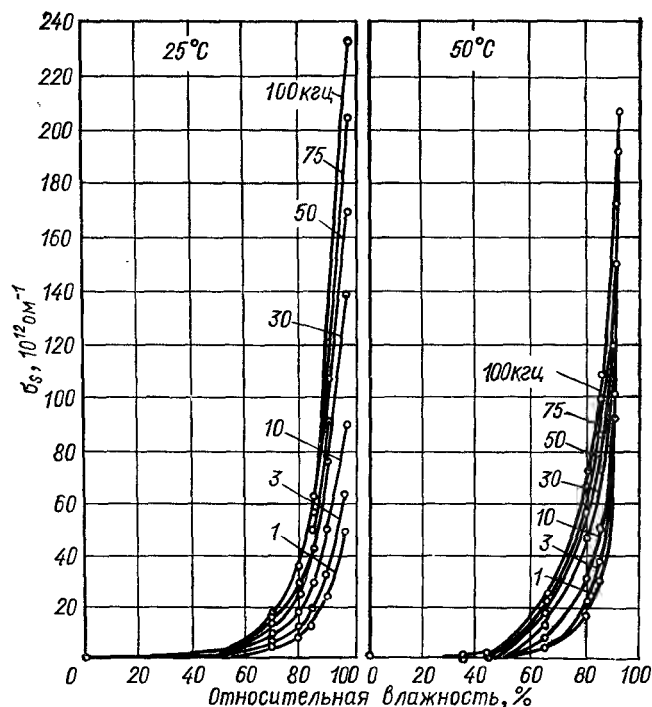


Рис. 20.3. Зависимость поверхностной проводимости σ_s боросиликатного стекла от относительной влажности окружающего воздуха и частоты [3].

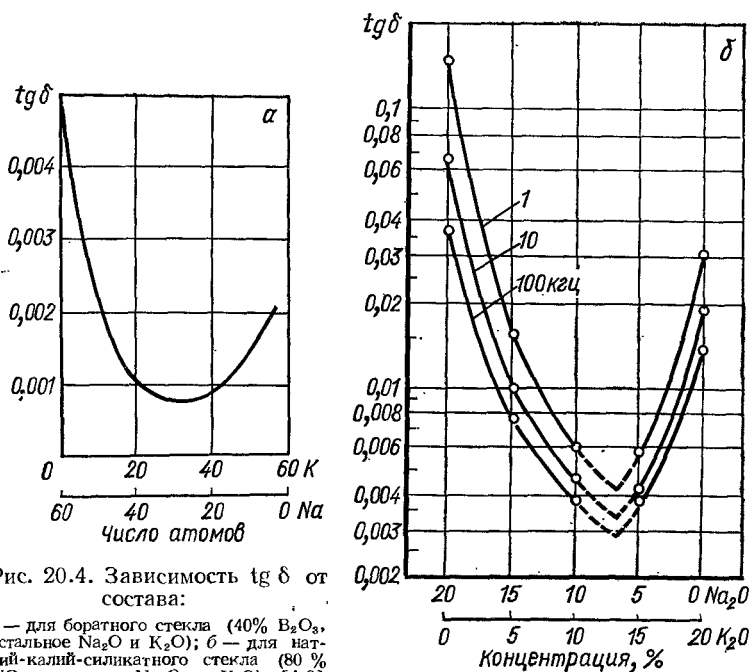


Рис. 20.4. Зависимость $\text{tg } \delta$ от состава:

a — для боратного стекла (40% B_2O_3 , остальное Na_2O и K_2O); б — для натрий-калий-силикатного стекла (80% SiO_2 , остальное Na_2O и K_2O) [4,3].

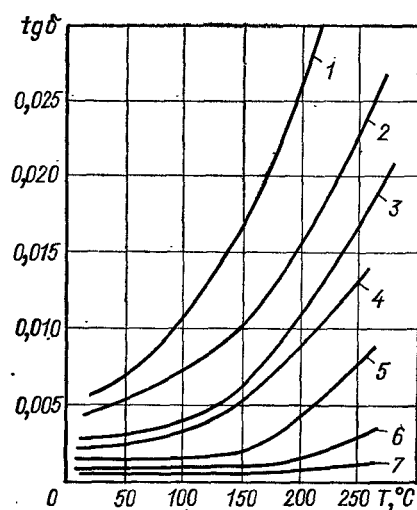


Рис. 20.5. Зависимость $\text{tg } \delta$ различных стекол от температуры:

1 — стекло № 46; 2 — стекло № 23; 3 — натриевый пирекс; 4 — нонекс; 5 — натриево-калийевый пирекс; 6 — калиевый пирекс; 7 — минос [4].

Диэлектрическая проницаемость стекол сильно зависит от их состава, увеличиваясь с увеличением содержания тяжелых окислов от $\epsilon = 3,75$ для кварцевого стекла до $\epsilon = 16,2$ для стекла, содержащего 80% PbO; $\lg \delta$ всех стекол возрастает с температурой; температур-

ный коэффициент ϵ (ТКЕ) технических стекол изменяется от 30 до $500 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Минимальное и наименее зависящее от частоты значение $\lg \delta$ имеет кварц [(1—2) $\times 10^{-4}$ от 1 до 300 МГц] (рис. 20.4, 20.5).

Таблица 20.2

Свойства электровакуумных стекол [6, 21]

Обозначения: T_p — температура размягчения; α — коэффициент расширения; ρ — удельное сопротивление; ϵ — диэлектрическая проницаемость; $\lg \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь.

Стекло	Химический состав, %	T_p , °C	$\alpha \cdot 10^{-7}$	T , °C	ρT , Ом·см	ϵ	$\lg \delta \cdot 10^{-4}$
C5-1 (кварцевое)	SiO ₂ > 99,5	> 1300	5—6	150 300 500 800	10 ¹⁷ 10 ¹³ 10 ¹⁰ 10 ⁷	3,75	1—2
П15* (7740 корнинг) (пирекс)	SiO ₂ 78,5 B ₂ O ₃ 15 Al ₂ O ₃ 2 Na ₂ O 3 K ₂ O 1,5	600	33,4	25 100 200	10 ¹⁵ 5·10 ¹¹ 5·10 ⁸	4,1—4,6	130—45
С 37—2* (7070 корнинг) (вольфрамовое)	SiO ₂ 70 B ₂ O ₃ 27 Na ₂ O 1,4 K ₂ O 1 Li ₂ O 0,6	600	37	25 250 350	10 ¹⁷ 2·10 ¹¹ 2·10 ⁷	4,0	6
С 39-1* (С 9, англ.) (вольфрамовое)	SiO ₂ 73 B ₂ O ₃ 16,5 PbO 6 Na ₂ O 3 K ₂ O 1,5	630	39,5	150 300	10 ¹¹ 10 ^{7,8}	4,2	13
С 49-1 (3С5 Na) (7050 корнинг) (молибденовое)	SiO ₂ 67,5 B ₂ O ₃ 20,3 Al ₂ O ₃ 2,5 Na ₂ O 8,7	580	49,0	25 250 350	10 ¹⁶ 10 ^{8,8} 10 ^{7,2}	4,9	33
С89-1 (0080 корнинг) (платиновое)	SiO ₂ 71,9 CaO 5,5 MgO 3,5 BaO 2 Na ₂ O 16,1 K ₂ O 1	560	89	25 250 350	10 ^{12,4} 10 ^{6,4} 10 ^{5,1}	7,2	90

* Значения ρ , ϵ и $\lg \delta$ даны по зарубежным аналогам, указанным в первом столбце таблицы в скобках.

Таблица 20.3

Газопроницаемость χ электровакуумных стекол [21]*

Газопроницаемость дается в см³ газа, приведенного к 0°C и 760 мм рт. ст., прошедшего через стеклянную перегородку площадью 1 см² и толщиной 1 мм за 1 сек при разности давлений 1 мм рт. ст.

Кварцевое стекло С5*

Гелий		Водород		Неон		Азот		Аргон	
T , °C	χ	T , °C	χ	T , °C	χ	T , °C	χ	T , °C	χ
—78	2·10 ⁻¹³	200	2·10 ⁻¹²	500	1,4·10 ⁻¹¹	600	6,5·10 ⁻¹²	800	1,6·10 ⁻¹²
0	6·10 ⁻¹²	300	10 ⁻¹¹	600	2,8·10 ⁻¹¹	700	1,32·10 ⁻¹¹	900	5,8·10 ⁻¹¹
100	6·10 ⁻¹¹	400	3,7·10 ⁻¹¹	700	4,2·10 ⁻¹¹	800	4,3·10 ⁻¹¹		
200	2·10 ⁻¹⁰	500	1,25·10 ⁻¹⁰	900	1,18·10 ⁻¹⁰	900	1,19·10 ⁻¹⁰		
400	10 ⁻⁹	700	2,52·10 ⁻¹⁰						
800	5·10 ⁻⁹	900	6,4·10 ⁻¹⁰						

Газопроницаемость для гелия

Пирекс*		С 39 — 2* (1720 корнинг)		С 89 — 1* (0080 корнинг)	
T, °C	χ	T, °C	χ	T, °C	χ
-78	10^{-14}	100	10^{-15}	25	$6 \cdot 10^{-16}$
0	$6 \cdot 10^{-13}$	200	$5 \cdot 10^{-14}$	100	$2 \cdot 10^{-14}$
100	10^{-11}	400	$3 \cdot 10^{-12}$	200	$5 \cdot 10^{-13}$
200	10^{-10}			400	$1,5 \cdot 10^{-11}$

* Данные приводятся по зарубежным аналогам.

Керамика [4, 5, 7, 9]

Керамика — поликристаллическое соединение окислов, иногда с примесью аморфной фазы (фарфор).

Наиболее высокими механическими, термическими и электронизоляционными свойствами обладают изделия из чистых окислов: Al_2O_3 , BeO , MgO . Примесь SiO_2 уменьшает термостойкость и увеличивает проводимость керамических изделий при высоких температурах.

Электротехническая керамика подразделяется на низковольтную, высоковольтную, дугостойкую и высокочастотную.

Низковольтный фарфор содержит значительное ко-

личество окислов щелочных металлов Na_2O и K_2O , увеличивающих его проводимость и $\text{tg} \delta$ и уменьшающих прочность на растяжение.

Высоковольтный стеатит обладает повышенными механическими и электрическими характеристиками.

Конденсаторная керамика (см. табл. 20.1) отличается повышенной диэлектрической проницаемостью и определенной ее зависимостью от температуры (TKE). Широко применяется керамика на основе ZrTiO_4 , TiO_2 , CaZrO_3 и CaTiO_3 ; используется также сегнетоэлектрическая керамика на основе титанатов бария и стронция с ϵ до 3000. Электрические свойства конденсаторных керамик приведены на рис. 20.6—20.9.

Таблица 20.4

Состав и свойства электротехнической керамики [4]

Керамика	Состав, %	T, °C	ρ_T , ом·см	$\text{tg} \delta$	$E_{\text{пр}}$, кв/мм	ϵ
Электротехнический фарфор	SiO_2 68—72 Al_2O_3 22—24 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 3,5—6	20	10^{14} — 10^{15}	0,035 (50 гц, 20°C)	20—28	6—7
		100	10^{10} — 10^{11}			
		200	10^7 — 10^9			
		300	10^8 — 10^7			
Высоковольтный стеатит	SiO_2 59 Al_2O_3 3 MgO 27 BaO 10 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 0,2	100	$5 \cdot 10^{13}$	0,002(20°C) 0,003(100°C)	20—25	6—6,5
		300	$5 \cdot 10^9$			

Таблица 20.5

Значения TKE ($d\epsilon/dT$) для различных температурных интервалов и материалов диэлектрика [7]

Группа TKE	Материал диэлектрика	TKE , 10^{-6} град $^{-1}$, для интервалов температур, °C		
		От -60 до +30	От +3 до +70	От +30 до +150
M-47	ТК-20	-75	-63	-32
M-75	ТК-20-80	-116	80	66
M-700	Т-80	-720	630	580
M-700	Ц-70	-713	640	565
M-1300	Т-150	-1600	1320	1050
H-40	T-900	см. рис. 20. 6		
H-70	СМ-1	см. рис. 20. 6		

Таблица 20.6
Маркировка конденсаторов по TKE [7]

$d\epsilon/dT$ (TKE), град $^{-1}$	Обозначение на корпусе	Цвет корпуса	Цвет маркировочной точки
$+120 \cdot 10^{-6}$	П-120	Синий	—
$+33 \cdot 10^{-6}$	П-33	Серый	—
$-33 \cdot 10^{-6}$	М-33	Голубой	Коричневый
$-47 \cdot 10^{-6}$	М-47	»	—
$-75 \cdot 10^{-6}$	М-75	»	Красный
$-150 \cdot 10^{-6}$	М-150	Красный	Оранжевый
$-220 \cdot 10^{-6}$	М-220	»	Желтый
$-330 \cdot 10^{-6}$	М-330	»	Зеленый
$-470 \cdot 10^{-6}$	М-470	»	Синий
$-750 \cdot 10^{-6}$	М-750	»	—
$-1500 \cdot 10^{-6}$	М-1500	Зеленый	—
$\pm 30\%*$	Н-30	Оранжевый	Зеленый
(от -60 до +85°C)			
$-50\%*$	Н-50	»	Синий
$-70\%*$	Н-70	»	—
$-90\%*$	Н-90	»	Белый

* Допустимое отклонение номинальной емкости.

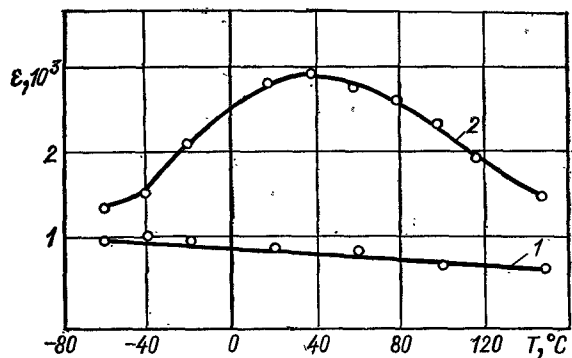


Рис. 20.6. Зависимость ϵ для сегнетокерамических материалов от температуры, $f = 1000$ гц [7]:
1 — Т-900 (Н40); 2 — СМ-1 (Н70).

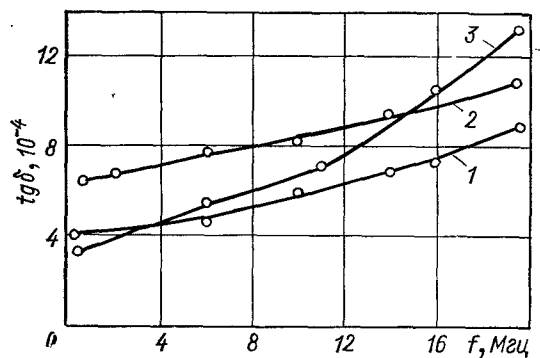


Рис. 20.8. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от частоты ($T = 20$ °C):
1 — ТК-20; 2 — Т-80; 3 — Т-150; [7].

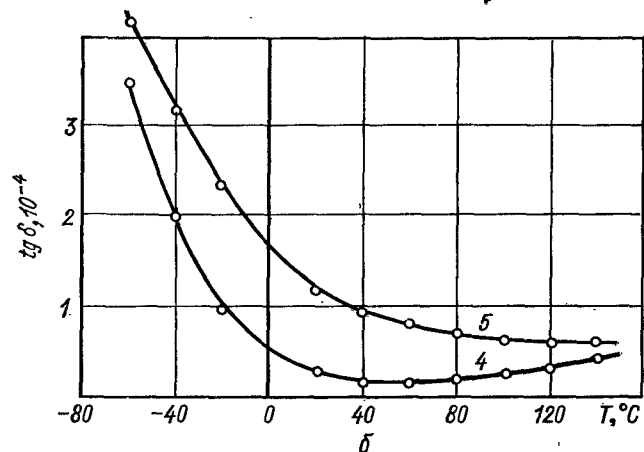
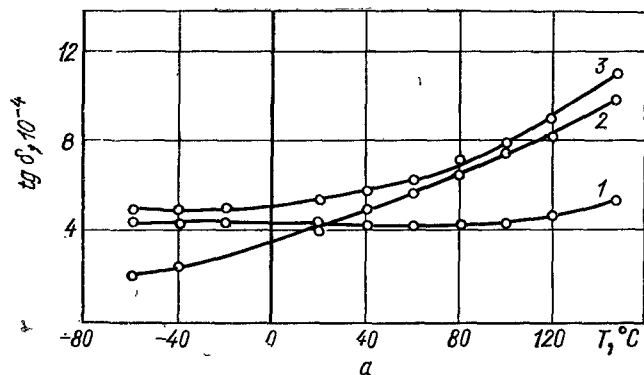


Рис. 20.7. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ для конденсаторной керамики от температуры [7]:
а — $f = 1 \div 3$ МГц; б — $f = 1000$ гц; 1 — Т-150; 2 — ТК-20;
3 — Т-80; 4 — Т-900; 5 — СМ-1.

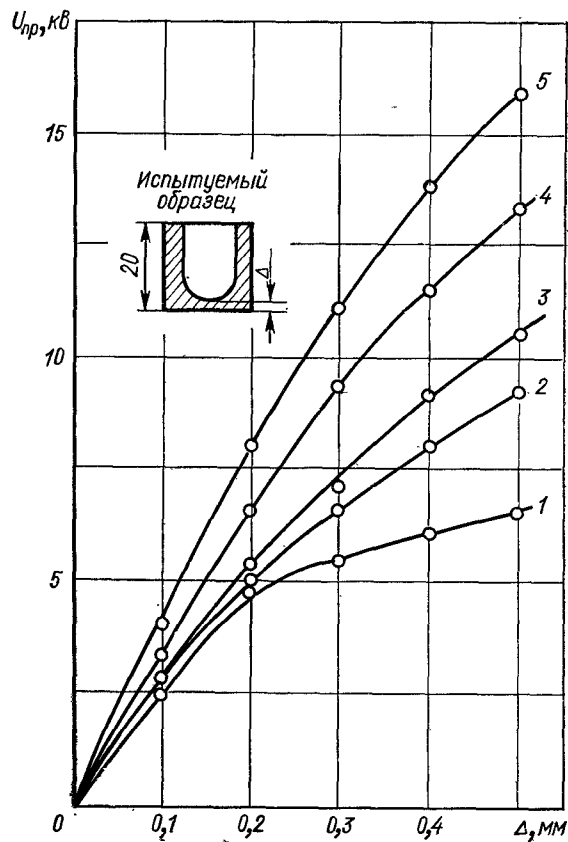


Рис. 20.9. Зависимость пробивного напряжения от толщины диэлектрика для конденсаторной керамики [7]:
1 — СМ-1; 2 — Т-900; 3 — Т-150; 4 — Т-80; 5 — ТК-20.

Полимеры **Электрические свойства**

Таблица 20.7

Свойство	Полиэтилен	Политетрафтор-этилен (тефлон) (фторопласт-4)	Полвинилхлорид	Полистирол	Полиметил-метакрилат (орг. стекло)	Эпоксидная смола
Термостойкость, °C	100	260	60—70	65—96	68—88	140
ρ , Ом·см	10^{16} — 10^{17}	10^{15} — 10^{16}	10^{14} — 10^{16}	10^{17} — 10^{18}	10^{14} — 10^{16}	10^{13} — 10^{14}
ϵ ($f = 10^6$ гц)	2,3	2	3—5	2,45—2,65	3,5—4,5	3,7
$\operatorname{tg} \delta$ ($f = 10^6$ гц)	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	0,03—0,08	$(1-3) \cdot 10^{-4}$	0,04—0,06	0,019
$E_{\text{пр}}$, кВ/мм	18—20	20—30	14—20	20—35	18—35	18

Электроизоляционные масла

В качестве электрических изоляторов применяются природные нефтяные масла (трансформаторное, конденсаторное, кабельное) и растительное касторовое (рициновое) масло.

Таблица 20.8

Свойства электроизоляционных масел [4]

Свойство	Трансформаторное масло	Касторовое масло (рициновое)
ϵ	2,1—2,3	4,0—4,4
$\operatorname{tg} \delta$	0,002—0,005	0,01—0,03
ρ , Ом·см	10^{14} — 10^{17}	$5 \cdot 10^{10}$ — $5 \cdot 10^{12}$
$E_{\text{пр}}$, кВ/мм	20	14—16

На рис. 20.10 представлена зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от содержания в нем воды.

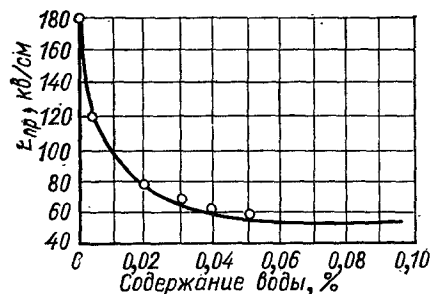


Рис. 20.10. Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от содержания воды [19].

20.4. СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ

Сегнетоэлектрики обладают спонтанной электрической поляризованностью при отсутствии внешнего поля. Они характеризуются очень высоким значением ϵ , сильно зависящим от температуры и приложенного напряжения, и наличием диэлектрического гистерезиса.

Таблица 20.9

Состав и свойства протонных сегнетоэлектриков [10, 11]

Свойство	Сегнетова соль*	Дигидро-фосфат калия	Дигидро-фосфат аммония	Дигидро-арсенат калия	Дигидро-арсенат аммония	Гуанидин** (ГАС)	Триглицинсульфат**
Состав	$\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	KH_2PO_4	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	KH_2AsO_4	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{AsO}_4$	$(\text{CN}_3\text{H}_6)_3\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	$(\text{CH}_2\text{NH}_2\text{COOH})_3\text{H}_2\text{SO}_4$
Точка Кюри, T_C , °K	$T_{C1} = 258$ $T_{C2} = 295,5$	123	147,9	95,6	216,1	473	320—323
Точка плавления, °C	58	252,6	190	288	300	—	—
Плотность, г/см³	1,775	2,34	2,311	2,85	1,803	—	—
Спонтанная поляризованность, мкК/см²	0 25 (макс.)	4,7	4,8	—	—	0,35	—
Кристаллическая структура	При $T_{C1} < T < T_{C2}$ моноклинная При $T_{C2} < T < T_{C1}$ ромбическая	Тетрагональная	—	Тетрагональная	—	Тригональная	Моноклинная

* Максимальное значение ϵ вдоль оси a : 6000 ($T = T_{C1}$); 4000 ($T = T_{C2}$); $\operatorname{tg} \delta = 0,35$ ($T_{C1} < T < T_{C2}$); $\operatorname{tg} \delta = 0,001$ ($T_{C2} < T < T_{C1}$).

Частота релаксации $\epsilon = 5 \cdot 10^6$ гц.

** Коэрцитивная сила $E_C = 1,5$ кВ/см.

*** $\epsilon = 9500$ при $T = T_C$.

Состав и свойства беспротонных сегнетоэлектриков кислородно-октаэдрического типа [10]

Название	Химический состав	Кристаллическая структура	Постоянные решетки, Å	Температура фазового перехода, °C	ϵ
Бария титанат	BaTiO ₃	Перовскит (тетрагональная)	$a = b = 3,98$ $c = 4,025$	+120	При 20°C $\epsilon = 1700 \div 2000$ в точке Кюри (120°C) $\epsilon = (8 \div 10) \cdot 10^3$
Лития танталат	LiTaO ₃	Ильменит	$a = 5,49$ $a = 56^\circ 30'$	> 450	
Натрия ниобат	NaNbO ₃	Перовскит (тетрагональная)	$a = 2 \times 3,921$ $b = 4 \times 3,885$ $c = 2 \times 3,921$ $\beta = 90^\circ 40'$	+640, 518, 480, 360	Антисегнетоэлектрик; при 20°C $\epsilon = 250$, при 360°C $\epsilon = 1000$
Свинца гафнат	PbHfO ₃	Перовскит	$a = 4,136$ $c/a = 0,991$	+215, 163	Антисегнетоэлектрик: при 20°C $\epsilon = 100$, при 215°C $\epsilon = 570$
Свинца ниобат	PbNb ₂ O ₆	Кубическая типа пироклора		570	при 20°C $\epsilon = 280$, при 570°C $\epsilon = 750$
Свинца танталат	PbTaO ₆	То же		260	при 20°C $\epsilon = 300 \div 400$, при 260°C $\epsilon = 1100$
Свинца титанат	PbTiO ₃	Перовскит (тетрагональная)	$a = 3,896$ $c = 4,144$	+500	при 20°C $\epsilon \approx 200$, при 500°C $\epsilon = 3500$
Свинца цирконат	PbZrO ₃	То же	$a = 4,150$ $c = 4,100$	+235	Антисегнетоэлектрик; при 20°C $\epsilon = 250$, при 235°C $\epsilon = 3750$
Стронция титанат	SrTiO ₃	Перовскит (кубическая)	$a = b = c = 3,898$	-250	

Сегнетоэлектрики подразделяются на протонные (сегнетова соль, дигидрофосфат калия, дигидроарсенаты калия и аммония и др.) и беспротонные (титанат бария, титанат свинца, цирконат свинца и др.).

На рис. 20.11 и 20.12 показана зависимость ϵ от температуры для сегнетовой соли и дигидрофосфата калия.

Большое практическое значение имеют смешанные сегнетоэлектрические кристаллы, отличающиеся малым $\text{tg } \delta$ и высоким удельным сопротивлением. Смешение двух сходных сегнетоэлектриков дает обычно сегнетоэлектрик с точкой Кюри, расположенной между точками Кюри компонентов, а смешение сегнетоэлектрика

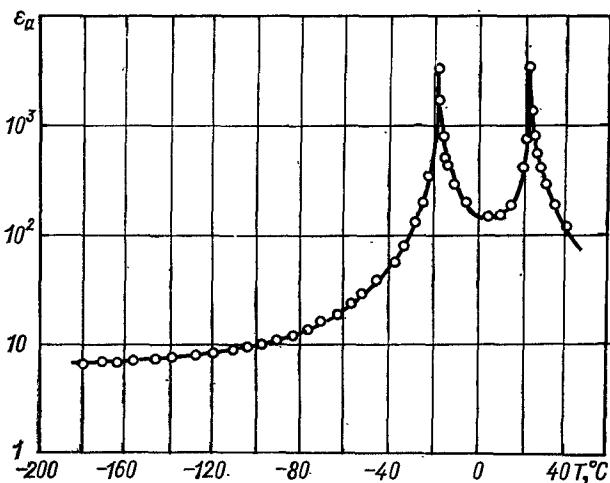


Рис. 20.11. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ_a в слабых полях для кристаллов сегнетовой соли ($f = 10^8$ гц) от температуры (измерения вдоль оси a) [11].

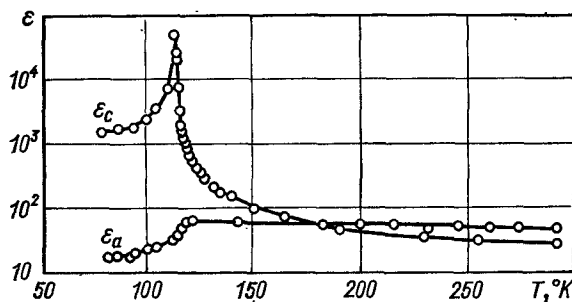


Рис. 20.12. Зависимость диэлектрической проницаемости дигидрофосфата калия от температуры (ϵ_a — измерения вдоль оси a , ϵ_c — измерения вдоль оси c) [11].

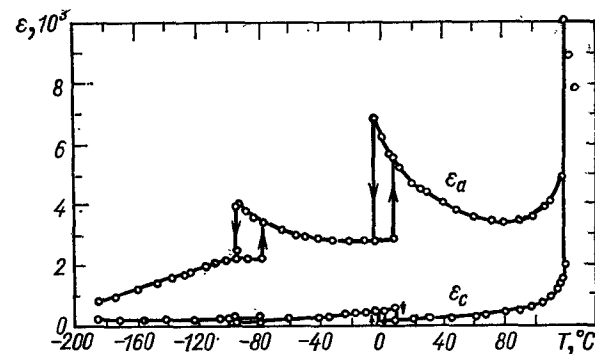


Рис. 20.13. Зависимость диэлектрической проницаемости монокристалла титаната бария от температуры (ϵ_a — измерения вдоль оси a , ϵ_c — измерения вдоль оси c) [4].

с сегнетоэлектриком приводит к выравниванию температурной кривой ϵ . Наиболее подробно изучены системы: $\text{BaTiO}_3 - \text{SrTiO}_3$; $\text{BaTiO}_3 - \text{CaTiO}_3$ и $\text{BaTiO}_3 - \text{SrTiO}_3 - \text{CaTiO}_3$ (см. рис. 20.13—20.16).

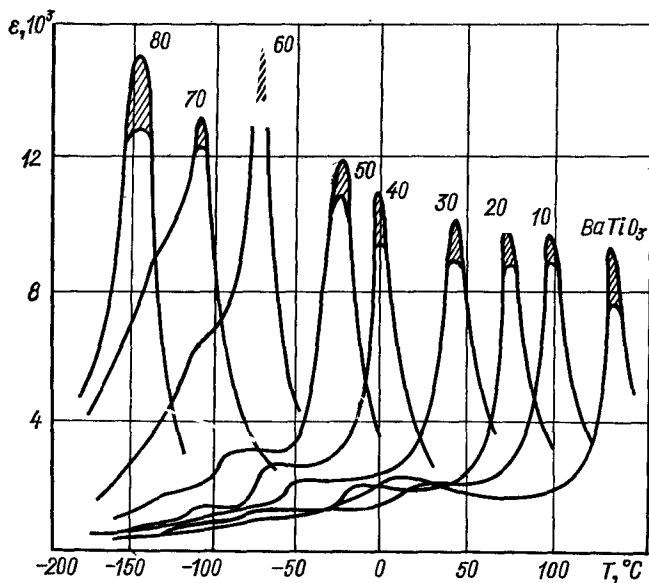


Рис. 20.14. Зависимость диэлектрической проницаемости растворов $\text{BaTiO}_3 - \text{SrTiO}_3$ от температуры [4]. (Числа — содержание SrTiO_3 , %.)

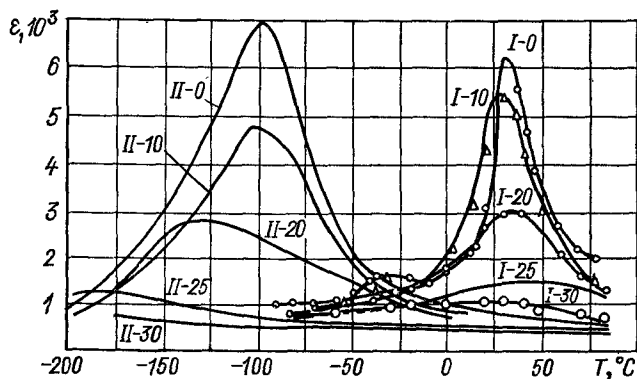


Рис. 20.16. Зависимость диэлектрической проницаемости тройных растворов $\text{BaTiO}_3 - \text{SrTiO}_3 - \text{CaTiO}_3$ от температуры [4]:

I — отношение $\text{BaTiO}_3 : \text{SrTiO}_3$, 3:1; II — отношение $\text{BaTiO}_3 : \text{SrTiO}_3$, 1:1. Числа у кривых — массовое содержание CaTiO_3 , % [10].

20.5. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКИ

Существуют прямой и обратный пьезоэлектрические эффекты.

Прямой пьезоэлектрический эффект называют эффект образования электростатических зарядов на поверхности диэлектрика и электрическую поляризацию внутри него, которые происходят в результате механического напряжения. В линейном приближении зависимость поляризованности P_i от однородного механического напряжения $T(K)$ может быть представлена в виде

$$P_i = d_{ik} T(k),$$

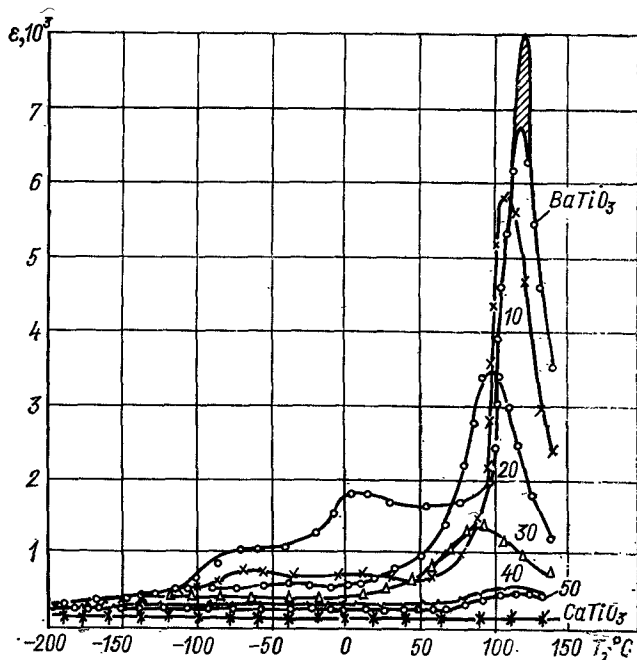


Рис. 20.15. Зависимость диэлектрической проницаемости растворов $\text{BaTiO}_3 - \text{CaTiO}_3$ от температуры [4]. Числа — содержание CaTiO_3 , %.

где d_{ik} — коэффициенты пропорциональности, называемые пьезоэлектрическими модулями.

Обратный пьезоэлектрический эффект заключается в возникновении механического напряжения в кристалле под действием приложенного к нему электрического поля.

Ниже описаны свойства пьезоэлектрических монокристаллов, широко применяемых в технике.

Монокристаллы. Кристаллический кварц является широко распространенным в природе минералом; при температуре ниже 573°C (температура $\alpha \rightleftharpoons \beta$ -превращения и фазового перехода второго рода) он кристаллизуется в тригональнопризматическом классе гексагональной системы и встречается в природе в двух модификациях: правой и левой (рис. 20.17)

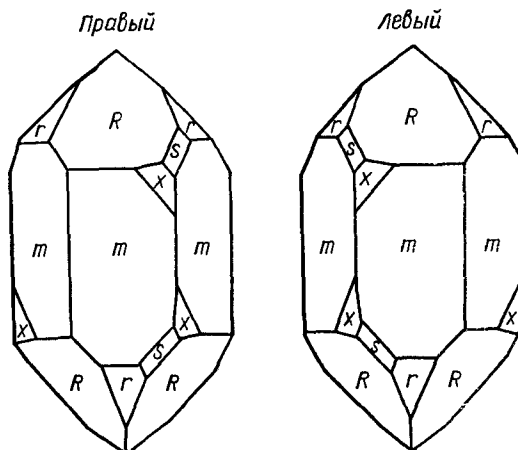


Рис. 20.17. Идеальные формы кристаллов кварца [12].

В настоящее время наряду с природными используются искусственные кристаллы кварца.

Пьезоэлектрические постоянные кварца. По условиям симметрии кристалл α -кварца имеет три независимых пьезоэлектрических модуля: $d_{11} = 6,94 \cdot 10^{-8}$; $d_{12} = -6,94 \cdot 10^{-8}$ и $d_{14} = -2,18 \cdot 10^{-8}$ ед. СГСЭ [14].

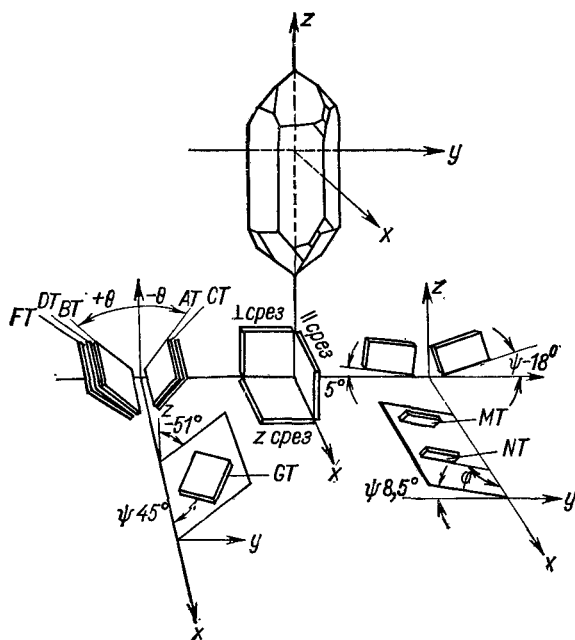


Рис. 20.18. Ориентация типовых срезов относительно осей кристалла кварца [12].

Первые два модуля соответствуют деформации растяжения — сжатия вдоль осей X и Y (рис. 20.18); третий (d_{14}) характеризует пьезоэлектрический эффект при деформации сдвига в плоскостях Z_y и Z_x , а также при скручивающих усилиях. Зависимость пьезоэлектрических модулей d_{11} и d_{14} от температуры см. на рис. 20.19.

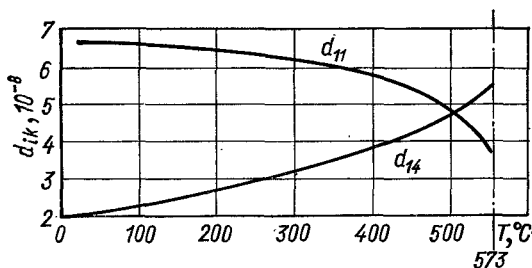


Рис. 20.19. Зависимость пьезоэлектрических модулей d_{11} и d_{14} для α -кварца от температуры (адиабатические значения) [12].

Упругие постоянные кварца. Для малых деформаций и напряжений с достаточной точностью выполняется обобщенный закон Гука, устанавливающий линейную зависимость между деформациями и напряжениями:

$$r_{ij} = s_{ijkl} t_{kl}; \quad i, j, k, l = 1, 2, 3,$$

где r_{ij} — компоненты тензора деформации; t_{kl} —

компоненты тензора напряжения; s_{ijkl} — компоненты тензора гибкости.

В свою очередь, напряжения могут быть выражены через деформации:

$$t_{ij} = c_{ijkl} r_{kl}; \quad i, j, k, l = 1, 2, 3.$$

где c_{ijkl} — тензор упругости.

Упругие свойства α -кварца описываются семью независимыми компонентами тензора гибкости и семью компонентами (модулями) тензора упругости.

Пьезоэлектрические свойства кварца широко используются в технике для стабилизации и фильтрации радиочастот, генерирования ультразвуковых колебаний и для измерения механических величин.

Пьезоэлектрические резонаторы вырезают из кристалла кварца параллельно или перпендикулярно кристаллографическим осям, а также под определенными углами к ним (см. рис. 20.18). Для получения необходимых электрических характеристик и малого температурного коэффициента резонансной частоты требуется высокая точность ориентации относительно кристаллографических осей.

Таблица 20.11

Динамический (адиабатический) модуль упругости c_{ij} (20°C) и константа гибкости s_{ij} α -кварца [13]

c_{ij}^* 10^{11} дин/см^2	s_{ij}^* $10^{-12} \text{ см}^2/\text{дин}$	c_{ij}^* 10^{11} дин/см^2	s_{ij}^* $10^{-12} \text{ см}^2/\text{дин}$
$c_{11} = 8,674$	$s_{11} = 1,277$	$c_{13} = 1,191$	$s_{13} = -0,122$
$c_{33} = 10,72$	$s_{33} = 0,966$	$c_{14} = -1,791$	$s_{14} = 0,450$
$c_{44} = 5,794$	$s_{44} = 2,004$	$c_{66} = 3,988$	$s_{66} = 2,912$
$c_{12} = 0,699$	$s_{12} = -0,179$		

Диэлектрические постоянные кварца. Диэлектрические постоянные кварца описываются двумя главными значениями ϵ — вдоль оптической оси (ϵ_3) и перпендикулярно к ней (ϵ_1): $\epsilon_3 = 4,65$; $\epsilon_1 = 4,55$ [14] (рис. 20.20).

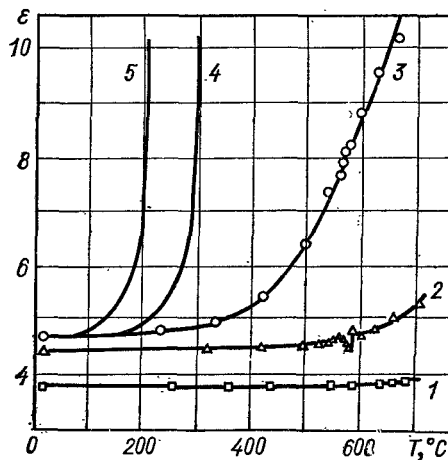


Рис. 20.20. Зависимость диэлектрической проницаемости кристаллического и плавленого кварца от температуры:

1 — для плавленого кварца; 2, 3 — ϵ_{11} и ϵ_{33} монокристаллов соответственно; 4, 5 — кривые, полученные Стьюартом [15] для ϵ_{33} на частотах 90 и 1 кГц соответственно [16].

Типовые срезы кварцевых резонаторов [12]

Срез	Углы ориентации, град			Частотный коэффициент, кГц·мм	Диапазон частот (МГц) и область применения
	φ	θ	ψ		
X	90	0	0	2870	Генераторы ультразвуковых частот
Y	0	0	0	1954	
BT	0	49°*	0	2580	3—12
AT	0	-35°15'2*	0	1700	0,25—3**
CT	0	-38°36'	0	3080	0,1—0,4
T	0	+52	0	2060	0,07—0,5
T	0	51°07'	±45	3292	0,1—0,5
MT	90	±34	+8°30'	2700	0,05—0,2
T	90	±38	+8°30'	2834*	0,004—0,05
0°	90	0	0	2720	0,05—0,15
+5°	90	0	+5	2815	
-18°30'	90	0	-18°30'	2554	0,05—0,5 — фильтры

* В зависимости от технических требований угол θ берется от +48 до +50°.

** В указанном диапазоне частот угол θ варьирует от 34°30' до 35°30'.

** При использовании гармоник срез — 35° употребляется до 40 МГц и более.

** Частотный коэффициент зависит от отношения ширины пластины к ее длине.

Сегнетова соль. Сегнетова соль является двойной натриево-калиевой солью виннокаменной кислоты с четырьмя молекулами кристаллизационной воды: $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

Сегнетова соль кристаллизуется в ромботетраэдрическом классе ромбической системы. Теоретически возможно существование правых и левых кристаллов сегнетовой соли; однако получаемые из отходов виноделия кристаллы сегнетовой соли бывают только правыми (рис.20.21).

Сегнетова соль имеет следующие физические свойства [12]: молекулярная масса 282 г; плотность 1,77 г/см³;

верхняя точка Кюри +22,5° С; нижняя точка Кюри — —15° С.

По условиям симметрии сегнетова соль имеет три независимых пьезоэлектрических модуля: $d_{14} = 2,4 \times 10^{-6}$ ед. СГСЭ; $d_{25} = 1,6 \cdot 10^{-6}$ ед. СГСЭ; $d_{36} = 3,5 \times 10^{-7}$ ед. СГСЭ.

Зависимость пьезоэлектрических модулей d_{14} , d_{25} и d_{36} сегнетовой соли от температуры представлена на рис. 20.22.

Наибольшее распространение имеют резонаторы 45°-го X-среза (рис. 20.21); они используются для получения продольных колебаний.

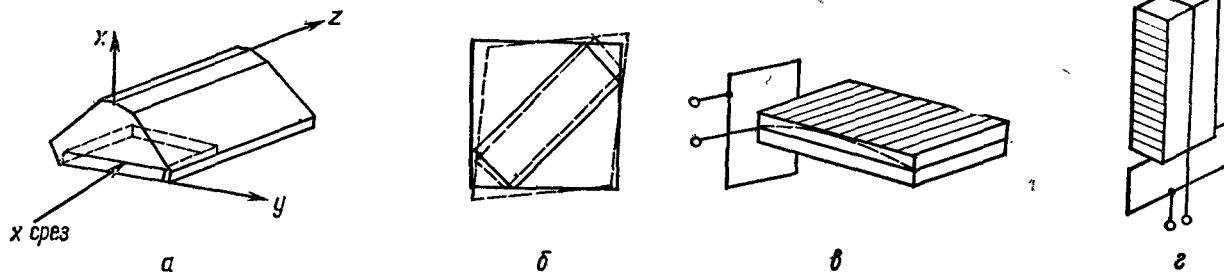
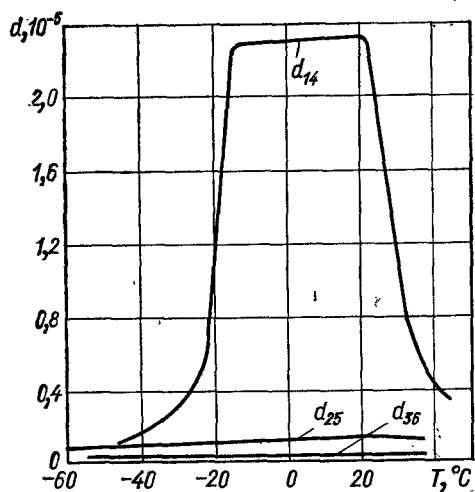


Рис. 20.21. Кристалл сегнетовой соли и различные виды пьезоэлементов [12].

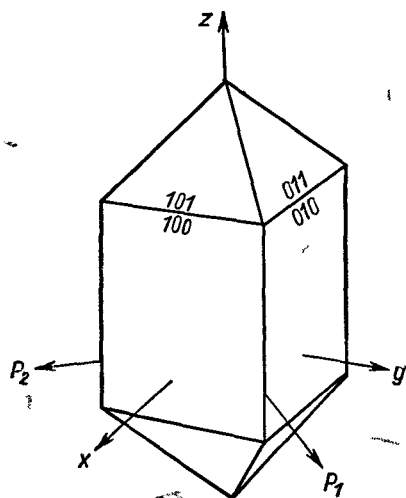
Температурная зависимость пьезоэлектрического модуля d_{36} дигидрофосфата аммония приведена на рис. 20.24.



The graph plots the dielectric constant d_{33} (in units of 10^{-8}) on the y-axis against temperature T (in $^{\circ}\text{C}$) on the x-axis. The y-axis ranges from 120 to 280 with major grid lines every 20 units. The x-axis ranges from -120 to 100 with major grid lines every 40 units. The data points, marked with 'x', show a steep decline from approximately 275 at -120°C to about 180 at -40°C , after which the decline becomes more gradual, reaching approximately 130 at 100°C .

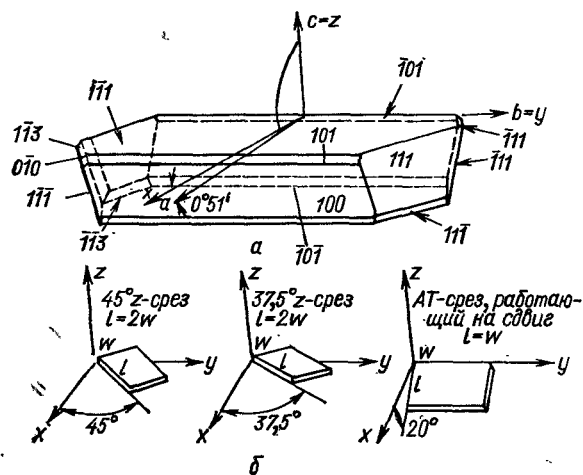
$T, ^{\circ}\text{C}$	$d_{33}, 10^{-8}$
-120	275
-110	260
-100	242
-80	198
-60	180
-40	170
-20	162
0	155
20	148
40	142
60	136
80	132
100	128

Дигидрофосфат аммония. Дигидрофосфат аммония $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ кристаллизуется в тетрагональной системе. Кристаллы его представляют собой комбинацию тетрагональной дипирамиды и призмы (см. рис. 20,23).



Кристаллы дигидрофосфата аммония получают и обрабатываются так же, как и кристаллы сегнетовой соли. Наиболее широко применяются срезы, перпендикулярные к оси Z.

Виннокислый калий. Виннокислый калий (условное обозначение ВК) кристаллизуется в моноклинной системе (рис. 20.25). Единственным элементом симметрии



Дигидрофосфат аммония характеризуется следующими свойствами [12]: точка плавления 190°C ; плотность $2,311\text{ г/см}^3$; точка Кюри — $135,3^{\circ}\text{C}$; пьезоэлектрн-

Физические свойства виннокислого калия [12]

Пьезоэлектрические модули, 10^{-8} ед. СГСЭ	Модуль упругости 10^{-12} см ² /дин	Диэлектрические постоянные	Коэффициенты линейного расширения, 10^{-6} град ⁻¹
$d_{14} = -25,0$	$s_{11} = +2,24$	$\epsilon_{11} = 6,44$	$\alpha_{11} = +12,0$
$d_{16} = +6,5$	$s_{12} = -0,08$	$\epsilon_{22} = 5,80$	$\alpha_{22} = +44,8$
$d_{21} = -2,2$	$s_{13} = -1,64$	$\epsilon_{33} = 6,49$	$\alpha_{33} = +32,0$
$d_{22} = +8,5$	$s_{15} = -0,64$	—	$\alpha_{15} = -12,0$
$d_{23} = -10,4$	$s_{22} = +3,37$	—	—
$d_{25} = -22,5$	$s_{23} = -1,05$	—	—
$d_{34} = +29,4$	$s_{25} = -0,57$	—	—
$d_{36} = -66,0$	$s_{33} = +3,86$	—	—
—	$s_{35} = +0,90$	—	—
—	$s_{44} = +11,9$	—	—
—	$s_{46} = +0,57$	—	—
—	$s_{55} = +8,15$	—	—
—	$s_{66} = +10,41$	—	—

кристалла виннокислого калия является ось двойной симметрии b . Как следствие этого, кристалл его имеет четыре значения диэлектрической проницаемости, восемь пьезоэлектрических модулей и 13 модулей упругости.

Низкая симметрия кристаллов виннокислого калия создает широкую возможность (из-за большого числа упругих постоянных) получения срезов с низким температурным коэффициентом частоты (см. рис. 20.25).

Этилен-диамин-тарtrat. Кристаллы этилен-диаминовой соли винной кислоты (условное обозначение ЭДВ) кристаллизуются в моноклинной системе (рис. 20.26, а). Химический состав этилен-диамин-тарtrата $C_6H_{14}N_2O_6$. Кристалл этилен-диамин-тарtrата имеет восемь независимых пьезоэлектрических модулей. Значения двух из них равны соответственно $d_{21} = 3,4 \times 10^{-7}$ ед. СГСЭ $d_{23} = -3,1 \cdot 10^{-7}$ ед. СГСЭ [12].

Наиболее употребительные срезы резонаторов с малым температурным коэффициентом резонансной частоты показаны на рис. 20.26. б.

Пьезоэлектрическая керамика. Пьезоэлектрические и другие свойства пьезокерамики титаната бария и его производных приведены в табл. 20.14. Зависимость пьезоэлектрического модуля d_{31} и диэлектрической проницаемости ϵ от температуры керамики ($Ba_{0,8}Ca_{0,08}Pb_{0,12}TiO_3$) показана на рис. 20.27.

Обозначения основных величин, принятые ниже, следующие: ρ — плотность (объемная масса) E_Y — модуль упругости (модуль Юнга); ϵ — диэлектрическая проницаемость; $\tan \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь; Q — добротность; f — частота; $\Delta f/f_0$ — уход резонансной частоты в указанном интервале температур; c_{33} — скорость звука; d — пьезоэлектрический модуль; d_{33} — пьезоэлектрический модуль продольных колебаний; d_{31} — пьезоэлектрический модуль радиальных колебаний; d/ϵ , $d/\sqrt{\epsilon}$ — характеристика эффективности в режиме приема; $dE_Y/\epsilon \tan \delta$, $dE_Y/\epsilon \tan \delta$ — характеристики эффективности в режиме излучения; σ_n — предел прочности на изгиб; σ_c — предел прочности на сжатие; σ_p — предел прочности на растяжение; K — коэффициент электрохимической связи; θ — точка Кюри; ТКЧ — температурный коэффициент резонансной частоты.

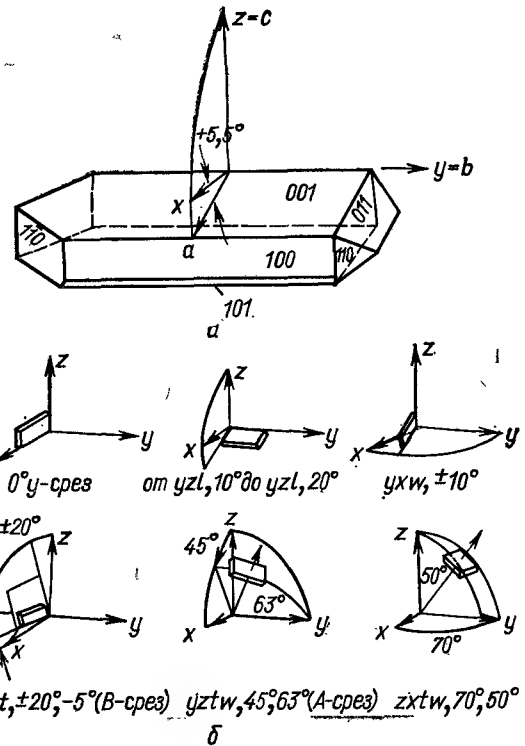


Рис. 20.26. Кристалл этилен-диамин-тарtrата: а — идеальная форма; б — срезы с нулевым температурным коэффициентом резонансной частоты [12].

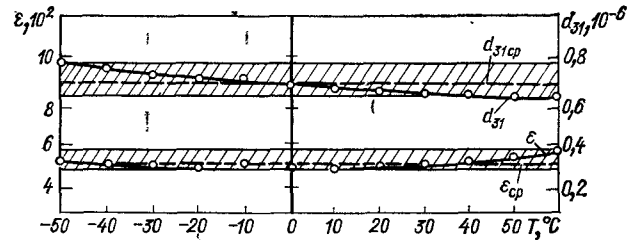


Рис. 20.27. Зависимость пьезоэлектрического модуля d_{31} и диэлектрической проницаемости ϵ от температуры керамики ($Ba_{0,8}Ca_{0,08}Pb_{0,12}TiO_3$) [17].

Цирконат-титанат свинца (ЦТС) и его производные. К числу наиболее эффективных керамических сегнетоэлектриков относятся пьезокерамические материалы системы ЦТС, представляющие собой твердые растворы цирконата свинца $PbZrO_3$ и титаната свинца $PbTiO_3$ с малыми добавками некоторых трех- и пятивалентных элементов и частичным замещением свинца стронцием. Пьезоэлектрические и другие свойства материалов ЦТС приведены в табл. 20.15.

Свойства пьезокерамики титаната бария и его производных [17, 18]

Величина	BaTiO ₂	(BaCa)TiO ₃ (содержание CaTiO ₃ 5—7%)	(Ba _{0,8} Ca _{0,08} Pb _{0,12}) _x × TiO ₃	(BaCa)TiO ₃ + Co
ρ , г/см ³	5,3—5,8	5,1—5,75	4,8—5,4	5,4
$E_{Ю}$, 10 ¹² дин/см ²	1,0—1,1	1,08—1,16	1,0—1,22	1,07—1,2
ϵ	1100—1800	670—1200	300—600	1000—1200
$\operatorname{tg} \delta$	$3 \cdot 10^{-3}$ — $3 \cdot 10^{-2}$	$(1,0—1,5) \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$ — $1 \cdot 10^{-2}$	$(1,0—1,5) \cdot 10^{-2}$
Q	400	500	1200	—
$\Delta f/f_0$ (от 0 до 40°C), %	7	3,6	0,2	1,7
$\Delta f/f_0$ (от 0 до 40°C), %	8,5	12	1,2	5,8
c_{33} , 10 ⁵ см/сек	4,15—4,3	4,45	4,8—5,3	4,46—4,5
d_{33} , 10 ⁻⁶ см/в	2,5—6,0	1,6—2,1	1,4—2,5	3,5
d_{13} , 10 ⁻⁶ см/в	1,3—2,5	0,95—1,74	0,4—1,5	1,1—1,35
d_{33}/ϵ , 10 ⁻⁹ см/в	2,27—3,33	1,75—2,4	4,2—4,7	2,9—3,5
d_{31}/ϵ , 10 ⁻⁹ см/в	1,18—1,39	1,41—1,45	1,33—2,5	1,1
$d_{33}/\sqrt{\epsilon}$, 10 ⁻⁷ см/в	0,75—1,41	0,61	0,81—1,02	1,1
$d_{31}/\sqrt{\epsilon}$, 10 ⁻⁷ см/в	0,39—0,59	0,36—0,5	0,23—0,61	0,35—0,39
$(d_{33}E_{Ю})^2$, 10 ¹² дин/см ²	6,25—43,4	1,02—4,1	1,96—9,3	14—17,6
$(d_{31}E_{Ю})^2$, 10 ¹² дин/см ²	1,69—7,5	2,95—5,8	0,16—2,5	1,4—2,5
$d_{33}^2 E_{Ю}/\epsilon \operatorname{tg} \delta$	0,79—1,9	0,28—0,43	1,27—2,2	0,8—1,3
$d_{31}^2 E_{Ю}/\epsilon \operatorname{tg} \delta$	0,13—0,51	0,14—0,19	0,18—0,46	0,12—0,13
σ_u , 10 ³ г/см ²	600—800	550	—	750
σ_c , 10 ³ г/см ²	3000—4500	3500	3000—5500	3300
σ_p , 10 ³ г/см ²	250	300	—	325
K	0,18—0,37	0,325	0,17—0,25	—
ТКЧ, 10 ⁻⁶ град ⁻¹	—	—	37—86	—

Таблица 20.15

Свойства материалов ЦТС [17, 18]

A — Pb_{0,95}Sr_{0,05}(Zr_{0,53}Ti_{0,47})O₃ + 1%Ta₂O₅;B — Pb_{0,95}Sr_{0,05}(Zr_{0,53}Ti_{0,47})O₃ + 1%Nb₂O₅

Величина	A	B
ρ , г/см ³	7,3	7,3
$E_{Ю}$, 10 ¹² дин/см ²	0,62	0,72
ϵ	1100	1760
$\operatorname{tg} \delta$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$
Q	70	70
$\Delta f/f_0$ (от 0 до +40°C), %	0,24	0,44
$\Delta f/f_0$ (от 0 до -40°C), %	0,24	0,44
c_{33} , 10 ⁵ см/сек	3,5—4,0	3,5—4,0
d_{33} , 10 ⁻⁶ см/в	8,5	10,9
d_{31} , 10 ⁻⁶ см/в	3,7	4,7
d_{33}/ϵ , 10 ⁻⁹ см/в	7,7	6,2
d_{31}/ϵ , 10 ⁻⁹ см/в	1,23	2,67
$d_{33}/\sqrt{\epsilon}$, 10 ⁻⁷ см/в	2,56	2,6
$d_{31}/\sqrt{\epsilon}$, 10 ⁻⁷ см/в	1,12	1,12
$(d_{33}E_{Ю})^2$, 10 ¹² дин/см ²	27,5	61,5
$(d_{31}E_{Ю})^2$, 10 ¹² дин/см ²	5,2	11,5
$d_{33}^2 E_{Ю}/\epsilon \operatorname{tg} \delta$	2,04	2,2
$d_{31}^2 E_{Ю}/\epsilon \operatorname{tg} \delta$	0,38	0,41
K	0,45	0,42
ТКЧ, 10 ⁻⁶	60	101
θ , °C	330	305

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жданов Г. С. Физика твердого тела. М., Изд-во МГУ, 1962.

- Франц В. Пробой диэлектриков. Пер. с англ. М. Изд-во иностр. лит., 1961.
- Беркс Дж. Б., Шульман Дж. Г. Прогресс в области диэлектриков. Т. 1, 2. Пер. с англ. М., Госэнергоиздат, 1963.
- Справочник по электротехническим материалам. Электроизоляционные материалы. Ч. 1. М.—Л., Госэнергоиздат, 1958.
- Кижджери В. Д. Измерения при высоких температурах. Пер. с англ. М., Металлургиздат, 1963.
- Любимов М. Л. Спаи металла со стеклом. М., «Энергия», 1968.
- Грибовский П. О., Терентьева Г. И. Миниатюрные керамические конденсаторы. М.—Л., «Энергия», 1966.
- Техника высоких температур. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
- Корицкий Ю. В. Электротехнические материалы. М., «Энергия», 1968.
- Справочник по электротехническим материалам. Т. 2. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
- Иона Ф., Ширане Д. Сегнетоэлектрические кристаллы. Пер. с англ. М., «Мир», 1965.
- Справочник по электротехническим материалам. Под общ. ред. К. А. Андрианова, Н. П. Богородицкого, Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова и Б. М. Тареева. Т. II. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
- Bechman R. "Phys. Rev.", 1958, v. 110, p. 1060.
- Смагин А. Г., Ярославский М. И. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы. М., «Энергия», 1970.
- Stuart M. R. "J. Appl. Phys.", 1955, v. 26, N 12, p. 1399.
- Зубов В. Г., Фирсова М. М., Молокова Т. М. «Кристаллографии», 1973, т. 8, с. 112.
- Глозман И. А. Пьезокерамика. М., «Энергия», 1967.
- Глозман И. А. Пьезокерамические материалы в электронной технике. М.—Л., «Энергия», 1965.

19. Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М. Электротехнические материалы. М., Госэнергоиздат, 1961.
20. Справочник по электротехническим материалам. Под

ред. Ю. В. Коридского, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. Т. 1. М., «Энергия», 1974.

21. Эспе В. Технология электровакуумных материалов. Пер. с нем. Т. 2. М., «Энергия», 1968.

ГЛАВА 21

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

21.1. ВВЕДЕНИЕ

Вещества, в которых при $T = 0^\circ\text{K}$ верхняя из заполненных электронами энергетических зон (валентная зона) и нижняя из незаполненных электронами энергетических зон (зона проводимости) не перекрываются, являются *полупроводниками* или *диэлектриками*. Граница между ними весьма условна — в полупроводниках энергетический зазор между зоной проводимости и валентной зоной не очень велик, что приводит к появлению в зонах заметного числа свободных носителей заряда при $T > 0^\circ\text{K}$.

Обычно к полупроводникам относят вещества с удельным сопротивлением $\rho \lesssim 10^{10} \text{ ом}\cdot\text{см}$ (при $T = 290^\circ\text{K}$). Поскольку в металлах $\rho = 10^{-6} \div 10^{-4} \text{ ом}\cdot\text{см}$ то удельное сопротивление полупроводников находится в интервале $10^{-3} \lesssim \rho \lesssim 10^{10} \text{ ом}\cdot\text{см}$.

Для веществ этого класса характерны рост проводимости с температурой, малая (по сравнению с металлами) концентрация носителей тока, высокая чувствительность электрических свойств по отношению к воздействию излучений и наличию примесей, а также неомическое поведение контактов.

Ширина запрещенной зоны. Ширина запрещенной зоны E_g представляет собой энергетический зазор между абсолютным максимумом валентной зоны и абсолютным минимумом зоны проводимости*.

Определяется она по изменению сопротивления с ростом температуры или оптическими методами (край полосы поглощения, длинноволновая граница фотопроводимости). Значение E_g зависит от температуры и давления; эта зависимость определяется коэффициентами $\alpha_T = dE_g/dT$ и $\alpha_P = dE_g/dP$ (коэффициенты изменения ширины запрещенной зоны с изменением температуры и давления соответственно).

Эффект Холла. В полупроводнике, помещенном в магнитное поле, перпендикулярное протекающему по нему току, возникает электрическое поле, направленное перпендикулярно току и магнитному полю. Это так называемый *эффект Холла*, описываемый соотношением

$$E_H = RjH,$$

где E_H — напряженность холловского электрического поля; j — плотность тока; H — напряженность магнитного поля; R — постоянная Холла. В случае носителей одного сорта (с концентрацией n) для изотропной зоны

$$R = \pm r/ne, \quad 1 \leq r < 2.$$

Здесь R измеряется в $\text{см}^2/\text{к}$, n — в см^{-3} , $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ к}$; r — числовой множитель (так называемый холл-фактор), значение которого определяется механизмом релаксации импульса носителей. Знак R связан со зна-

ком заряда носителей ($R < 0$ в образцах n -типа, $R > 0$ в образцах p -типа).

При наличии двух сортов носителей (например, электронов и дырок) R зависит от напряженности магнитного поля:

$$R = \frac{R_n \sigma_n^2 (1 + \sigma_p^2 H^2 R_p^2) + R_p \sigma_p^2 (1 + \sigma_n^2 H^2 R_n^2)}{(\sigma_n + \sigma_p)^2 + \sigma_n \sigma_p (R_n + R_p) H^2}.$$

Здесь $\sigma_n = ne\mu_n$, $\sigma_p = pe\mu_p$, $R_n = -1/ne$, $R_p = 1/pe$. При $H \rightarrow \infty$ $R \rightarrow 1/e(p - n)$, если $p \neq n$, и $R = (1/ne)[(\mu_p - \mu_n)/(\mu_p + \mu_n)]$, если $p = n = n_i$.

Подвижность носителей и проводимость. Дрейфовая подвижность $\mu = v_{др}/E$, где $v_{др}$ — дрейфовая скорость носителя, E — электрическое поле. Дрейфовая подвижность носителей определяется прямыми опытами по измерению времени распространения инжектируемого импульса неосновных носителей в образце.

Удельная проводимость σ связана с дрейфовыми подвижностями μ_n и μ_p и концентрациями электронов n и дырок p соотношением

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p).$$

Измерение эффекта Холла позволяет определить холловскую подвижность $\mu_H = |R\sigma|$, связанную с дрейфовой подвижностью соотношением $\mu_H = \mu \cdot r$.

Время жизни носителей. Время жизни τ — время, характеризующее экспоненциальный спад неравновесной концентрации носителей в результате их рекомбинации. Существуют следующие механизмы рекомбинации: излучательный (энергия рекомбинирующей пары электрон — дырка излучается в виде фотона), фононный (энергия пары передается решетке), ударный (энергия пары передается третьей частице).

Чаше всего имеет место не прямая рекомбинация, а процесс идет через рекомбинационные центры (примеси, дефекты).

Теоретическая оценка времени излучательной рекомбинации τ_R дает верхний предел τ .

Поверхностная рекомбинация. Помимо рекомбинации в объеме носители могут рекомбинировать на поверхности полупроводника. Скорость поверхностной рекомбинации s определяется как скорость потока частиц из объема к поверхности, необходимого для поддержания на ней избыточного числа неравновесных носителей. Значение s сильно зависит от способа обработки поверхности. Так, для Ge при травлении поверхности в кипящей H_2O_2 $s \sim 10 \text{ см/сек}$, а при шлифовке $s \sim 10^8 \text{ см/сек}$ и более. Обычно $s \sim 10^2 \div 10^8 \text{ см/сек}$.

Длина диффузии. Длина диффузии L_D — расстояние, характеризующее пространственный спад неравновесной концентрации носителей до равновесного значения. Значение L_D определяется соотношением $L_D = \sqrt{D\tau}$, где D — коэффициент диффузии, τ — время жизни. Коэффициент диффузии и подвижность связаны соотношением Эйнштейна $D = \frac{kT}{e} \mu$ (в невырожденном полупроводнике). Максимальная длина диффузии

*Это определение не относится к материалам с инвертированной зонной структурой типа HgTe (см., например, работу [84]).

Время рекомбинации τ и время излучательной рекомбинации τ_R для некоторых полупроводников [162]. Концентрация носителей близка к собственной, $T=300^\circ\text{K}$.

Элемент	Si	Ge	InSb	InAs	PbS	PbSe	PbTe
τ_R , сек	3	0.3	$3 \cdot 10^{-7}$	10^{-6}	10^{-6}	$3 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$
τ , сек	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-7}$	10^{-7}	10^{-6}	—	—

характеризует степень совершенства и чистоты кристалла. При $T = 300^\circ\text{K}$ $L_D \sim 0,5$ см в Ge, $L_D \sim 0,3$ см в Si и $L_D = 10^{-2} \div 10^{-3}$ см в InSb [162].

Структура зон и эффективные массы. Эффективная масса носителя m^* характеризует его движение в кристаллической решетке. Обратная эффективная масса $(m^*)^{-1}$ — тензорная величина, определяемая зависимостью энергии носителя E от его волнового вектора k :

$$(m_{ij}^*)^{-1} = \frac{1}{\hbar^2} \left[\frac{\partial^2 E(k)}{\partial k_i \partial k_j} \right].$$

Обычно достаточно знать вид $E(k)$ лишь вблизи экстремальных точек — минимумов или максимумов энергии. Изоэнергетические поверхности вблизи экстремумов представляют часто в виде сфер (с эффективными массами, например, для нескольких подзон валентной зоны m_{p1} , m_{p2} и т. д.) или эллипсоидов (с эффективными массами для зоны проводимости m_{n1} , $m_{n\perp 1}$, $m_{n\perp 2}^*$).

Для анализа различных экспериментальных данных часто пользуются скалярной величиной эффективной массы плотности состояний (m_{dn} и m_{dp} для электронов и дырок соответственно), которая в случае эллипсоидальных изоэнергетических поверхностей находится из соотношения

$$m_d = N^{2/3} (m_{p1} m_{\perp 1} m_{\perp 2})^{1/3},$$

где N — число экстремумов зоны.

В случае энергетических зон, имеющих вырожденные сферические поверхности постоянной энергии с эффективными массами m_{p1} , m_{p2} и т. д., эффективная масса плотности состояний определяется следующим образом:

$$m_{dp} = (n_{p1}^{2/3} + m_{p2}^{2/3} + \dots)^{3/2}.$$

Вводится также понятие омической эффективной массы m_o и циклотронной эффективной массы m_c , определяемых соотношениями:

$$\frac{1}{m_o} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{m_{\parallel}} + \frac{1}{m_{\perp 1}} + \frac{1}{m_{\perp 2}} \right)$$

(эллипсоидальные изоэнергетические поверхности),

$$m_c = \frac{\hbar}{2\pi} \frac{\partial S}{\partial E}$$

(S — площадь сечения изоэнергетической поверхности плоскостью, нормальной к магнитному полю).

Общие выражения для масс m_d , m_n , m_c см., например, в работе [84].

Прямой метод определения $E(k)$ и эффективных масс является циклотронный резонанс. Ценные сведения о зонной структуре и эффективных массах дают измерения анизотропии магнетосопротивления, эффек-

тов типа Шубникова — де Гааза и магнетооптических эффектов.

Собственная концентрация носителей. Собственная концентрация носителей n_i соответствует идеально чистому материалу и вычисляется, если известна структура зон и эффективные массы, по формуле

$$n_i = 4,82 \cdot 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m_{dn} m_{dp}}{m_0^2} \right)^{3/4} \exp \left(\frac{E_g - \alpha_T T}{kT} \right).$$

Здесь m_{dn} , m_{dp} — эффективные массы плотности состояний электронов и дырок соответственно; m_0 — масса свободного электрона; k — постоянная Больцмана; α_T — коэффициент температурной зависимости ширины запрещенной зоны.

Обычно n_i определяют экспериментально по данным измерений эффекта Холла и проводимости в соответствующем интервале температур.

Температура Дебая. Температура Дебая T_D определяется через граничную частоту ω_m колебаний решетки с помощью соотношения

$$kT_D = \hbar \omega_m.$$

Различным ветвям колебаний соответствуют различные температуры Дебая. Значения T_D , определяемые из тепловых измерений, являются усредненными по различным (существенным при температуре измерений) ветвям колебаний. Более детальную информацию дают, например, измерения упругих констант.

Предельные частоты оптических фононов. Предельные частоты ω_L , ω_T оптических фононов — частоты соответствующих (продольных и поперечных) оптических колебаний решетки с длинами волн, значительно превышающими межатомное расстояние. Определяются из спектров поглощения и отражения инфракрасного излучения, а также с помощью нейтронной спектроскопии. В элементах (Si, Ge и др.) $\omega_L = \omega_T = \omega_0$.

Фактор спектроскопического расщепления. Фактор спектроскопического расщепления g определяется расщеплением энергетических уровней носителей в магнитном поле за счет их магнитного момента

$$E = \left(N + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_H \pm \frac{1}{2} g \hbar \omega_H, \quad N = 1, 2, \dots,$$

где ω_H — циклотронная частота носителя в кристалле. Определяется из измерений осцилляционных эффектов в магнитном поле методом пара- и ядерного магнитного резонанса.

Диэлектрическая проницаемость. Значения диэлектрической проницаемости ϵ_0 и ϵ_∞ получают из статических и высокочастотных (или оптических) измерений соответственно.

Коэффициент термо-э. д. с. Коэффициент термо-э. д. с. — α -э. д. с., возникающая на концах образца при разности температур между горячим и холодным концами в 1° .

В таблицах приводятся значения определенных выше величин и, кроме того, значения плотности ρ , температуры плавления $T_{пл}$ и удельной теплопроводности λ , а также энергии ионизации доноров E_D и акцепторов E_A .

Везде, где не отмечено специально, приводятся значения E_g при 0°K , а μ и χ — при 300°K .

В таблицы в основном включены данные о полупроводниках с $E_g < 3$ эв. Свойства тройных и более сложных полупроводниковых соединений не приведены*. Не приводятся также сведения о параметрах различных полупроводниковых приборов**.

* О свойствах некоторых классов тройных соединений см. работы [16, 121, 123, 145].

** См. работу [43].

* Часто $m_{\perp 1} = m_{\perp 2}$, тогда употребляется обозначение $m_{\perp}$ ($= m_{\perp 1} = m_{\perp 2}$).

Электрофизические свойства элементарных полупроводников

Элемент	Кристаллическая структура		Литера-тура	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Литера-тура	$T_{пл}, ^\circ\text{K}$	Литера-тура	$T_D, ^\circ\text{K}$	Литера-тура	$\kappa, \frac{\text{вт}}{\text{см} \cdot \text{град}}$	Литера-тура	ϵ_0	Литера-тура	$\frac{1}{\epsilon_\infty}$	Литера-тура
	Тип	$a, b, c, \text{\AA}$													
B	Тетрагональная C_{4V}	$a = 8,73$ $c = 5,03$	[1] [1]	2,33	[189]	2300	[9]	—	—	—	—	12	[28]	10,1*	[28]
C (алмаз)	Кубическая O_h^5	$a = 3,566$	[1]	3,51	[123]	4300	[123]	2240*	[123]	5,5	[147]	—	—	5,7	[121]
P (черный)	Орторомбическая D_{2h}^{18}	$a = 3,31$ $b = 4,38$ $c = 10,5$	[1] [1] [1]	2,69	[9]	317	[242]	—	—	—	—	—	—	—	—
As (серый)	Тригональная D_{3d}^5	$a = 3,75$ $c = 10,52$	[1] [1]	5,73	[189]	1090* 500	[109] [242]	224	[9]	—	—	—	—	—	—
Se	Тригональная D_{3d}^4, D_{3d}^6	$a = 4,36$ $c = 4,96$	[117] [117]	4,80	[117]	490	[117]	$\perp 200$ $\parallel 500$	[120]	0,029	[117]	—	—	$\perp 8^{4*}$ $\parallel 13,5^{4*}$	[117]
α -Sn	Кубическая O_h^7	$a = 6,46$	[1]	5,77	[121]	[505] ^{6*} (β -Sn)	[121]	230	[121]	0,67	[121]	—	—	—	—
Sb	Тригональная D_{3d}^5	$a = 4,49$ $c = 11,25$	[1] [1]	6,70	[141]	903,5	[9]	204	[141]	0,4 (100°K)	[147]	—	—	—	—
Te	Тригональная D_{3d}^4, D_{3d}^6	$a = 4,46$ $c = 5,93$	[123] [123]	6,23	[123]	723	[123]	$\perp 140$ $\parallel 290$	[120] [120]	0,03	[147]	—	—	$\perp 23^{4*}$ $\parallel 39^{4*}$	[28] [28]
I	Орторомбическая D_{2h}^{18}	$a = 4,77$ $b = 7,25$ $c = 9,77$	[1] [1] [1]	4,94	[189]	387	[109]	—	—	—	—	10,3	[9]	—	—

* $\lambda = 1 \text{ мкм.}$ ** $\hbar\omega_t = \hbar\omega_e = 0,165 \text{ эв}$ [123].** $\rho = 35,8 \text{ атм.}$ ** $\lambda = 10 \text{ мкм; } \perp, \parallel$ — перпендикулярно и параллельно оси c соответственно.** Переходит в β -Sn при $t = 285,2 ^\circ\text{C}$.

Элемент	E_g , эВ	Литера- тура	$\frac{dE_g}{dT} \cdot 10^{-4}$ $\frac{\text{эВ}}{\text{град}}$	Литера- тура	$\frac{dE_g}{dP} \cdot 10^{-6}$ $\frac{\text{эВ}}{\text{град}}$	Литера- тура	m_n/m_e	Литера- тура	m_p/m_e	Литера- тура	$\frac{\mu_n}{\text{сМ}^2}$ $\text{в} \cdot \text{сек}$	Литера- тура	$\frac{\mu_p}{\text{сМ}^2}$ $\text{в} \cdot \text{сек}$	Литера- тура
B	1,16 ($T > 1000^\circ\text{K}$) 1,7	[113] [123]	-3,5	[11]	—	—	—	—	0,7	[242]	1	[11]	50	[16]
C(алмаз)	5,4	[28]	-1,2	[28]	$< 10^{-8}$	[242]	—	—	2,35 2,1	[15] [123]	1800 ($\sim T^{-3/2}$)	[11]	1400 ($\sim T^{-3/2}$)	[123] [11]
P (черный)	0,33	[36]	2,3	[36]	—	—	—	—	—	—	220 ($\sim T^{-3/2}$)	[123] [36]	350 ($\sim T^{-3/2}$)	[123] [36]
As (серный)	1,2	[123]	-5	[36]	—	—	$m_1=0,121$ $m_2=0,138$ $m_3=1,18$	[254] [254] [254]	$m_1=0,122$ $m_2=$ $=0,0805$ $m_3=1,04$	[254] [254] [254]	65	[123]	65	[123]
Se	2,85 2	[101] [84]	-9 -23,8	[123] [101]	-13	[123]	—	—	0,96	[123]	—	—	20 40—240	[11] [119]
α -Sn	0*	[171]	-0,5 0	[122] [123]	0	[123]	0,0242*	[122]	$m_d=0,26$	[122]	2500 ($\sim T^{-1,65}$) $10^5 (78^\circ\text{K})$ 10^5 ($4,2^\circ\text{K}$)	[11] [238]	2400 ($\sim T^{-2}$)	[11]
Sb	0,13	[123]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Te	0,32	[11]	-1,9**	[11]	-13 -16 -20	[191] [123] [120]	$m_{\perp}=$ $=0,0374^{**}$ $m_{\parallel}=$ $=0,059$	[120] [120]	$m_{\perp}=$ $=0,115^{**}$ $m_{\parallel}=$ $=0,264$ $m_d=0,4$	[120] [120] [37]	1700 ($\sim T^{-3/2}$)	[16]	1200 ($\sim T^{-3/2}$)	[16]
I	1,3	[28]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* См. рис. 21.1.

** В минимуме (111).

*** $\frac{dE_g}{dT} \cdot 10^{-4}$ эВ/град: -1,8 ($T=4^\circ\text{K}$); -0,4 ($100^\circ\text{K} < T < 300^\circ\text{K}$); -0,9 ($300^\circ\text{K} < T < 500^\circ\text{K}$) [120].*** $g_{\perp} = 11,2$; $g_{\parallel} = 7,0$; $\perp$ и $\parallel$ — перпендикулярно и параллельно оси c соответственно [120].*** Данные для верхней валентной зоны. В нижней валентной зоне $m_{\parallel} = 0,048 \cdot m_0$; $m_{\perp} = 0,25 m_0$; $\parallel$ и $\perp$ — параллельно и перпендикулярно оси c соответственно.

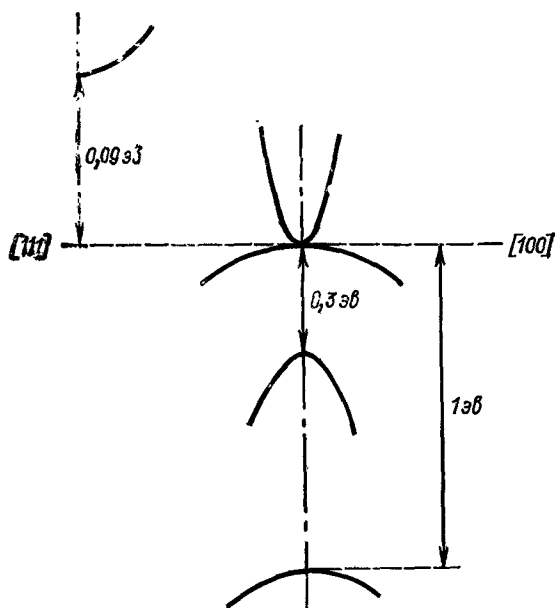


Рис. 21.1. Зонная структура α -Sn [171].

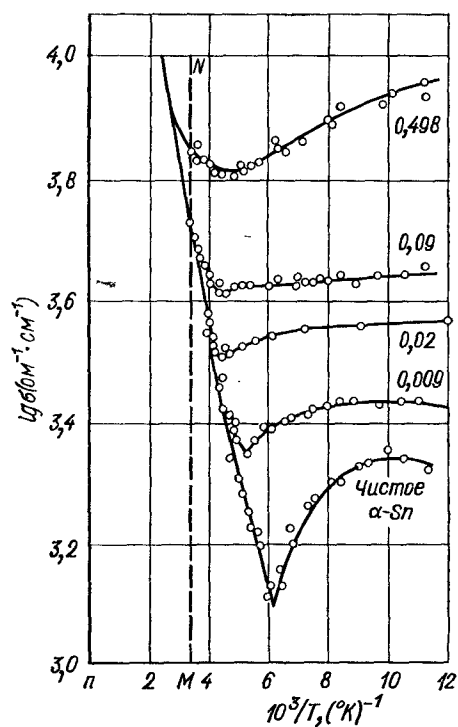


Рис. 21.2. Зависимость удельной проводимости σ для α -Sn, легированного алюминием, от температуры:

Числа у кривых — массовое содержание Al, %; MN — температура превращения α -Sn $\rightarrow$ β -Sn [16].

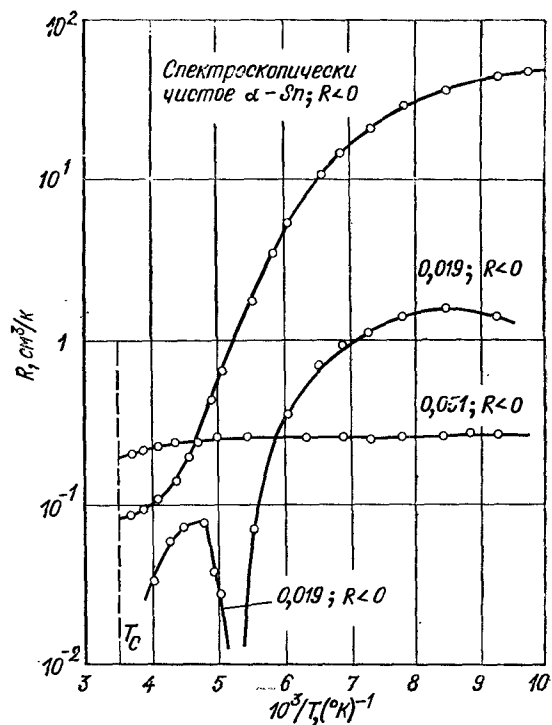


Рис. 21.3. Зависимость постоянной Холла R для α -Sn от температуры (числа у кривых — массовое содержание Al, %) [224].

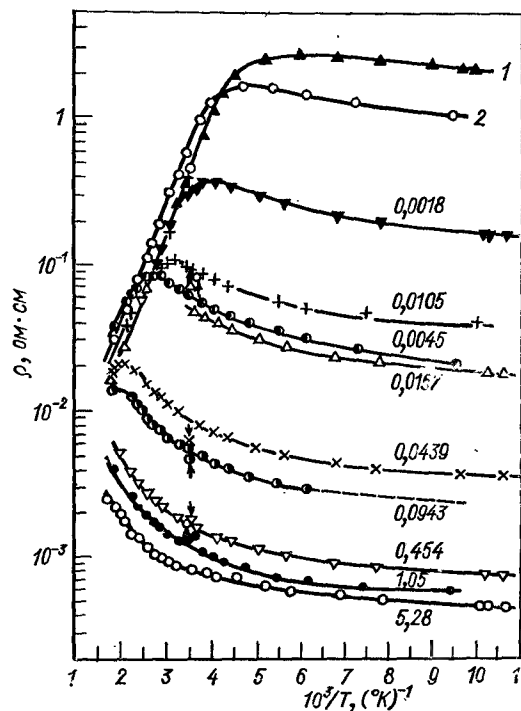


Рис. 21.4. Зависимость удельного сопротивления ρ в p -Te с примесью Sb от температуры [224]:

1 — тройная дистилляция; 2 — двойная дистилляция; числа у кривых — атомное содержание Sb, %.

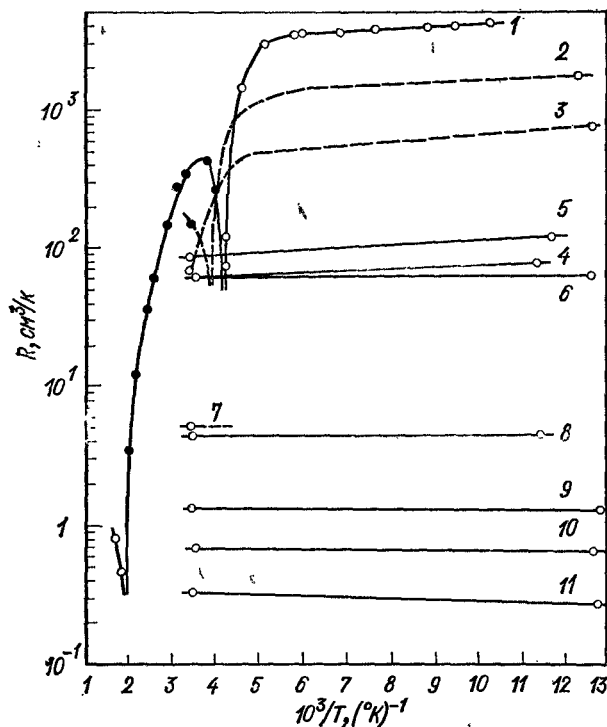


Рис. 21.5. Зависимость постоянной Холла R в Те [224] от температуры. Образцы те же, что и на рис. 21.4.

○ — положительный сигнал; ● — отрицательный
1 — тройная дистилляция; 2 — двойная осцилляция. Атомное содержание Sb, %: 3 — 0,0018; 4 — 0,0045; 5 — 0,0105; 6 — 0,0137; 7 — 0,0439; 8 — 0,0943; 9 — 0,454; 10 — 1,05; 11 — 5,28.

21.3. КРЕМНИЙ И ГЕРМАНИЙ

Кремний и германий — широко используемые и наиболее исследованные полупроводники. Кристаллизуются в решетке алмаза. Имеют сложную зонную структуру.

В Si шесть эквивалентных абсолютных минимумов зоны проводимости расположены на осях [100] внутри зоны Бриллюэна. Вблизи каждого из этих минимумов

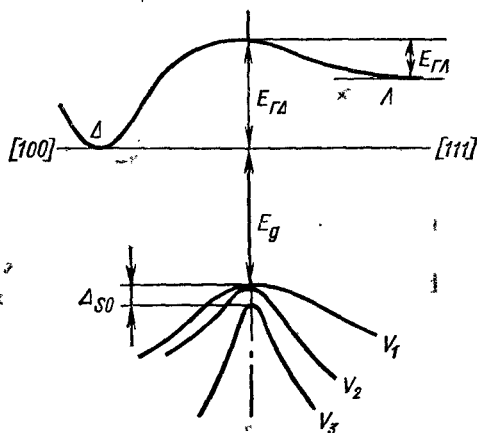


Рис. 21.6. Зонная структура Si [117].

изоэнергетические поверхности имеют вид эллипсоидов вращения (число эллипсоидов — 6).

В Ge восемь эквивалентных абсолютных минимумов зоны проводимости расположены на осях [111] на границе зоны Бриллюэна. Вблизи каждого из этих минимумов изоэнергетические поверхности — эллипсоиды вращения (эквивалентное число эллипсоидов — 4).

Валентные зоны Si и Ge расщеплены на три подзоны, две из которых вырождены в точке $k = 0$, а третья отщеплена спин-орбитальным взаимодействием.

Схемы энергетических зон Si и Ge (с использованными в таблицах обозначениями) представлены на рис. 21.6, 21.7.

Электrofизические свойства Si и Ge иллюстрируются рис. 21.8—21.32.

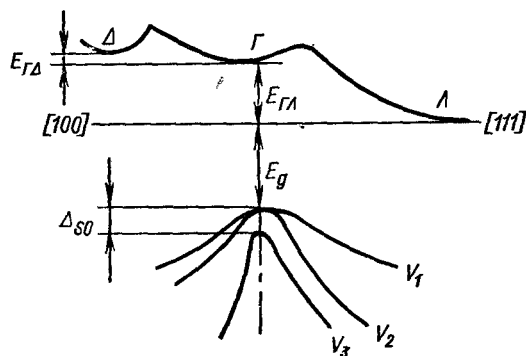


Рис. 21.7. Зонная структура Ge [117].

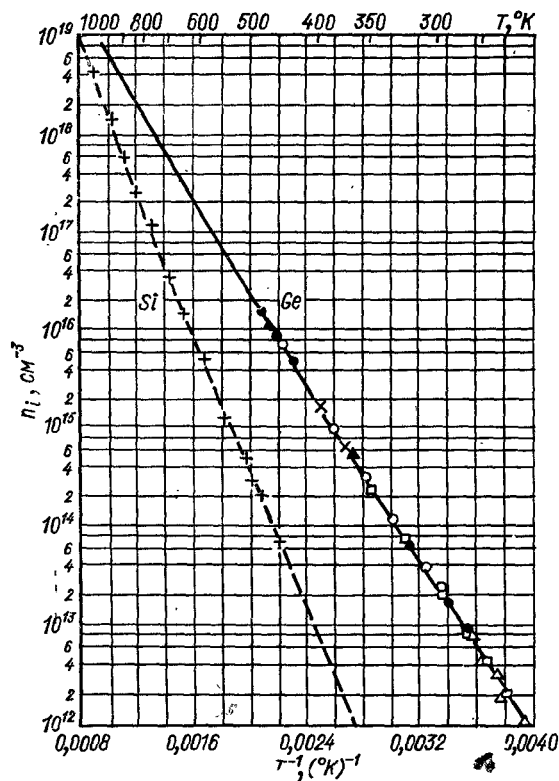


Рис. 21.8. Зависимость собственной концентрации n_i в Ge и Si от температуры [221].

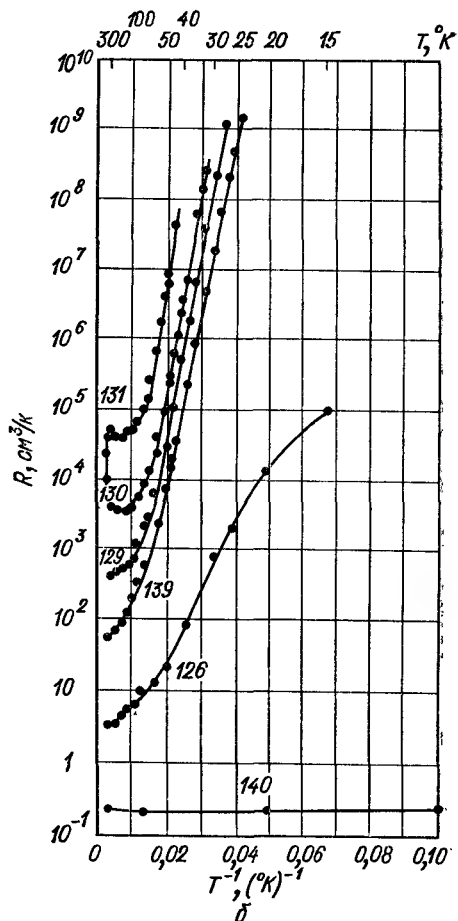
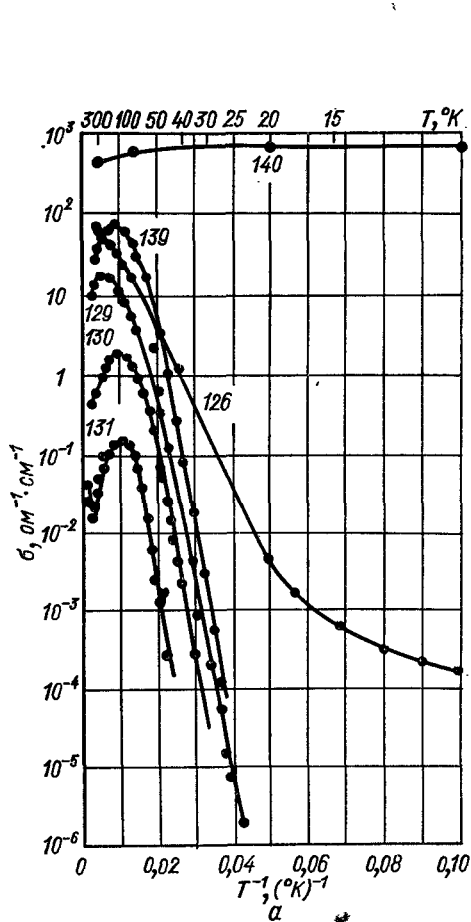


Рис. 21.9. Зависимость удельной проводимости σ n -Si с примесью As [117] (а) и постоянной Холла R в n -Si (б) от температуры:

№ образца	Концентрация As, см^{-3}	Концентрация акцепторов, см^{-3}	№ образца	Концентрация As, см^{-3}	Концентрация акцепторов, см^{-3}
126	$2,2 \cdot 10^{18}$	—	131	$2,75 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{14}$
129	$2,2 \cdot 10^{18}$	$1,5 \cdot 10^{15}$	139	$1,3 \cdot 10^{17}$	$2,2 \cdot 10^{15}$
130	$2,6 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{14}$	140	$2,7 \cdot 10^{19}$	—

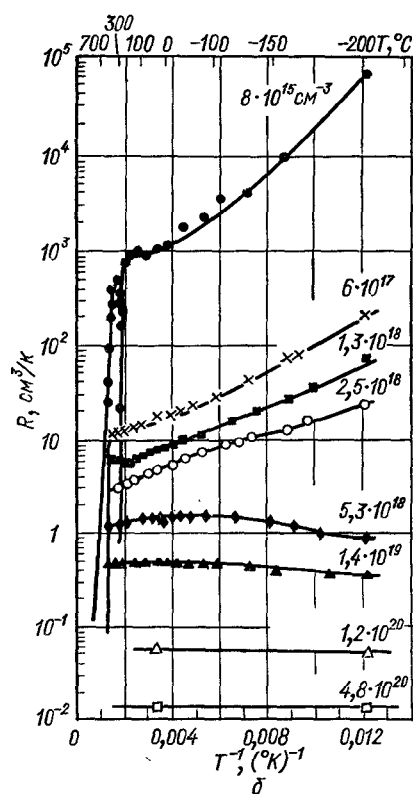
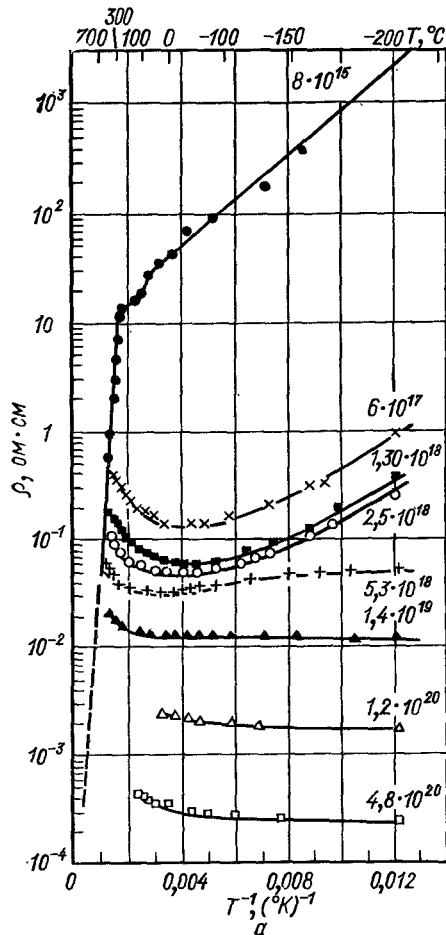


Рис. 21.10. Зависимость удельного сопротивления ρ в p -Si [222, 223] (а) и постоянной Холла R в p -Si (б) [223] от температуры при различной концентрации дырок в области насыщения.

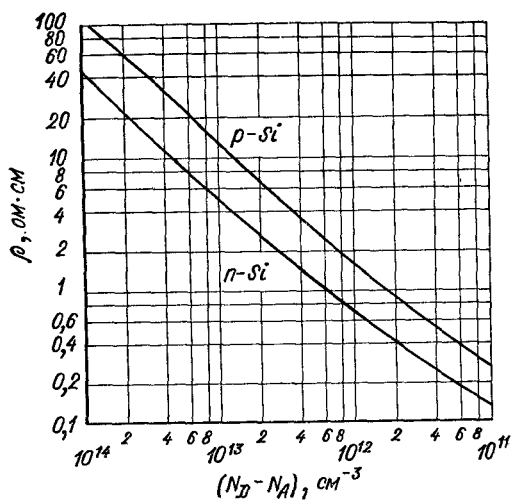


Рис. 21.11. Зависимость удельного сопротивления ρ в p - и n -Si от концентрации носителей [226].

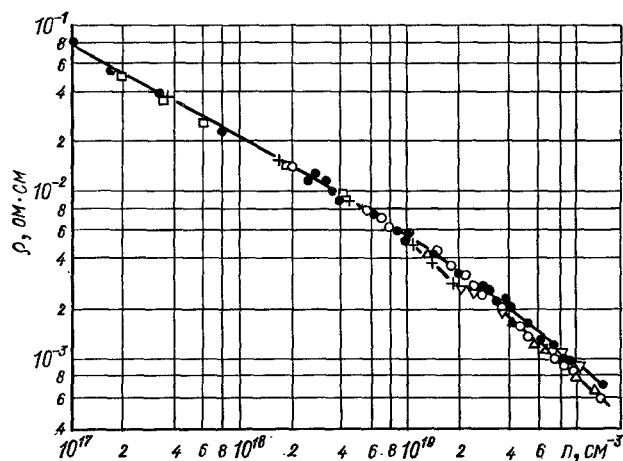


Рис. 21.12. Зависимость удельного сопротивления ρ в сильно легированном n -Si от концентрации носителей [225].

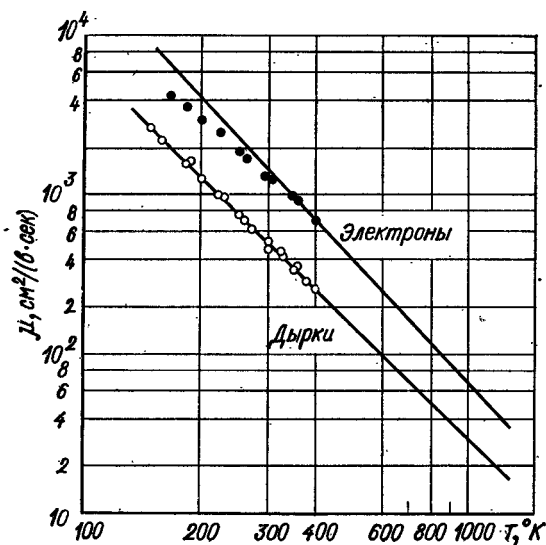


Рис. 21.13. Зависимость подвижности μ электронов и дырок в чистом Si от температуры [222].

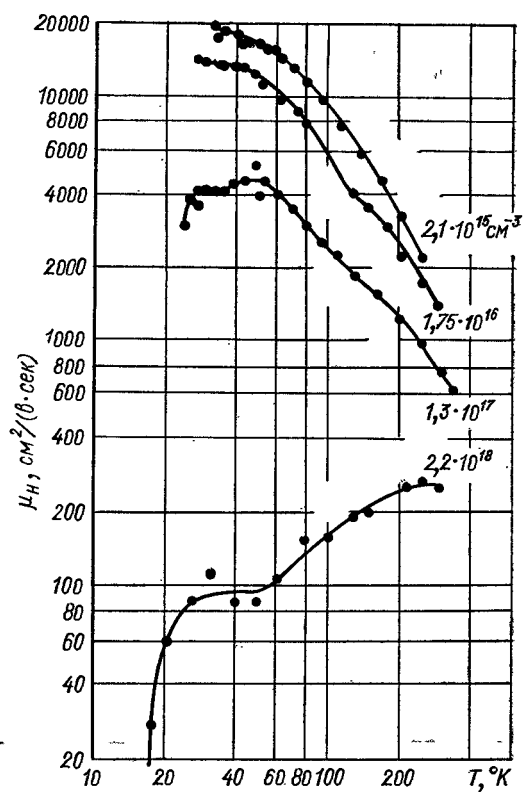


Рис. 21.14. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов в n -Si от температуры [222] при различной концентрации примеси As.

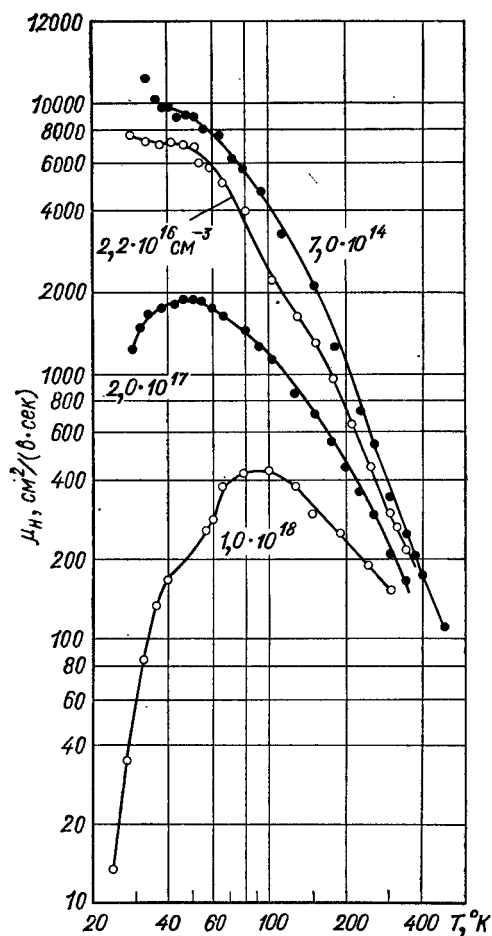


Рис. 21.15. Зависимость холловской подвижности μ_H дырок в p -Si от температуры при различной концентрации примеси В [222].

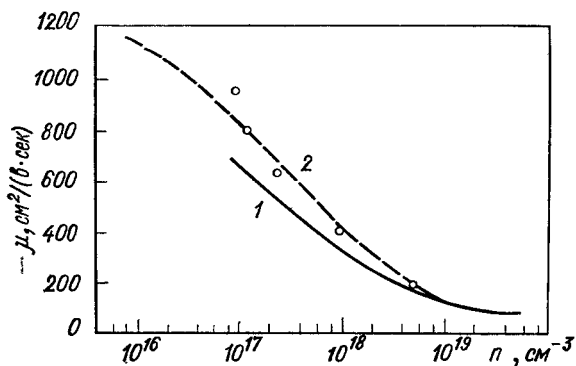


Рис. 21.16. Зависимость дрейфовой (1) и холловской (2) подвижностей электронов μ в n -Si от концентрации электронов n [10].

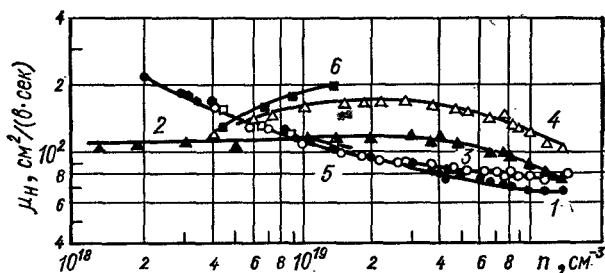


Рис. 21.17. Зависимость холловской подвижности электронов в сильно легированном n -Si от концентрации электронов [225]. Цифры у кривых соответствуют разным температурам и примесям:

$T, ^\circ K$	As	P	Sb
300	1	3	5
78	2	4	6

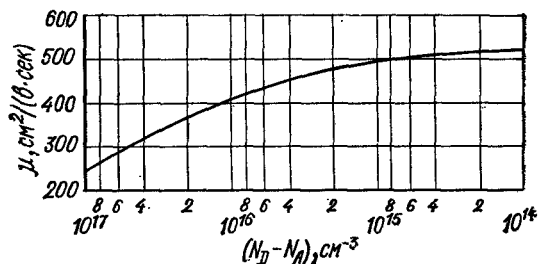


Рис. 21.18. Зависимость дрейфовой подвижности дырок μ в Si при температуре 300° K от концентрации [226].

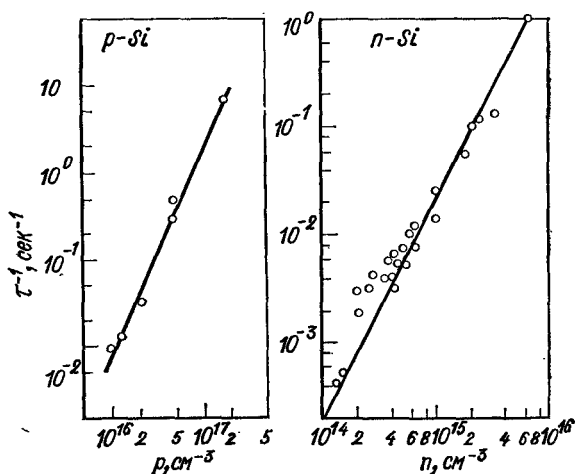


Рис. 21.19. Зависимость времени жизни τ неосновных носителей в Si от концентрации основных носителей при наличии ловушек ($T = 300^\circ K$) [10].

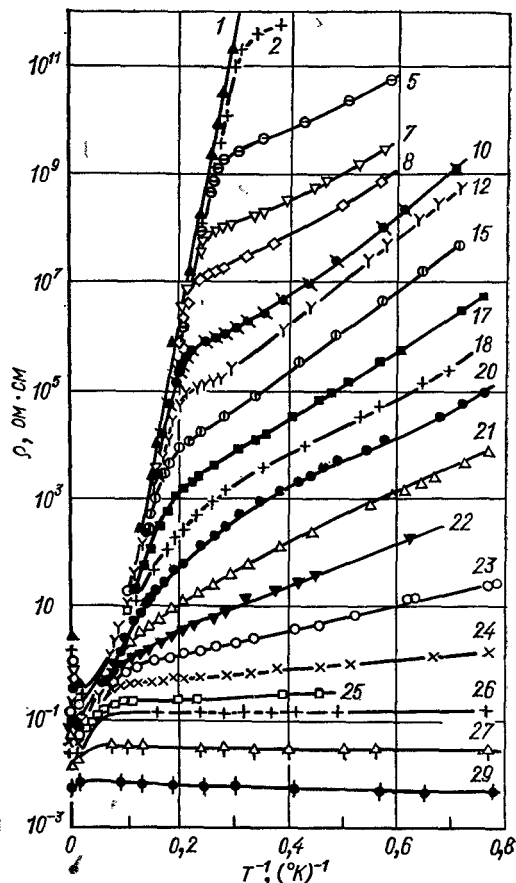


Рис. 21.20. Зависимость удельного сопротивления n -Ge с примесью Sb при низкой температуре от температуры [117]:

Номер образца	Концентрация Sb, см^{-3}	Номер образца	Концентрация Sb, см^{-3}
1	$5,3 \cdot 10^{14}$	18	$3,5 \cdot 10^{11}$
2	$9,3 \cdot 10^{14}$	20	$5,5 \cdot 10^{11}$
5	$1,6 \cdot 10^{15}$	21	$5,5 \cdot 10^{11}$
7	$2,3 \cdot 10^{15}$	22	$6,4 \cdot 10^{11}$
8	$3,0 \cdot 10^{15}$	23	$7,4 \cdot 10^{11}$
10	$5,2 \cdot 10^{15}$	24	$8,4 \cdot 10^{11}$
12	$8,5 \cdot 10^{15}$	25	$1,2 \cdot 10^{12}$
15	$1,3 \cdot 10^{16}$	26	$1,3 \cdot 10^{12}$
17	$2,4 \cdot 10^{16}$	27	$2,7 \cdot 10^{12}$
		29	$9,5 \cdot 10^{12}$

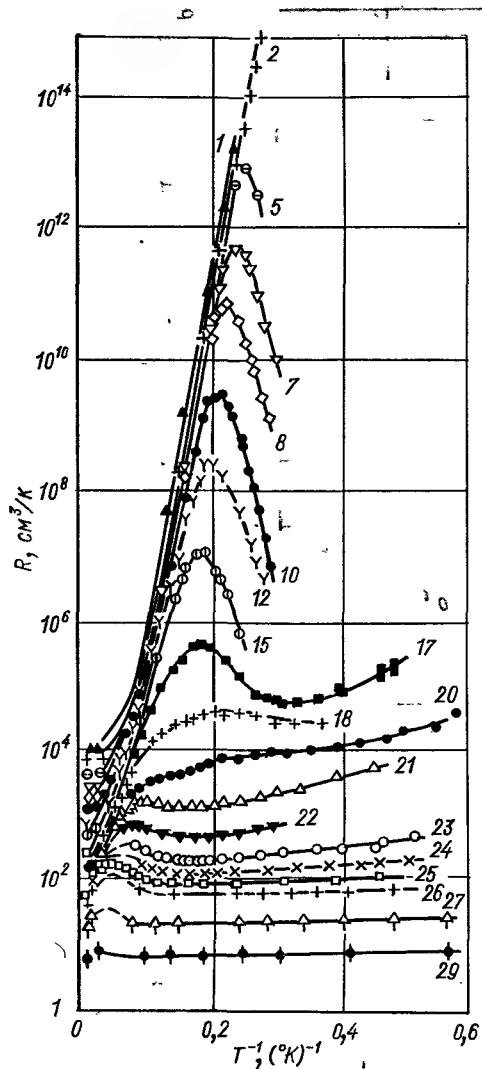


Рис. 21.21. Зависимость постоянной Холла R в n -Ge, с примесью Sb при низкой температуре от температуры [117] (обозначения см. в подписи к рис 21.20).

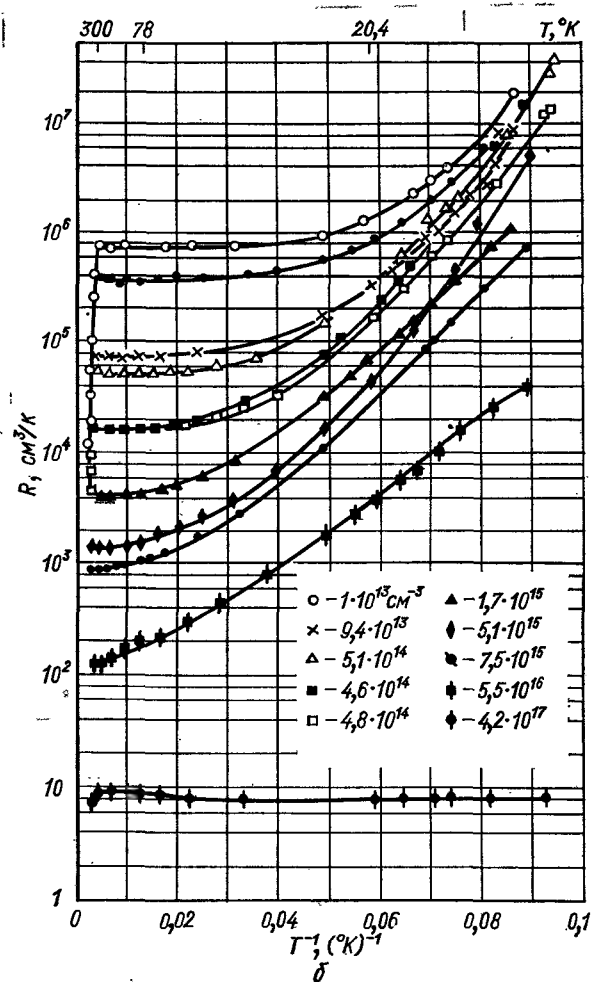
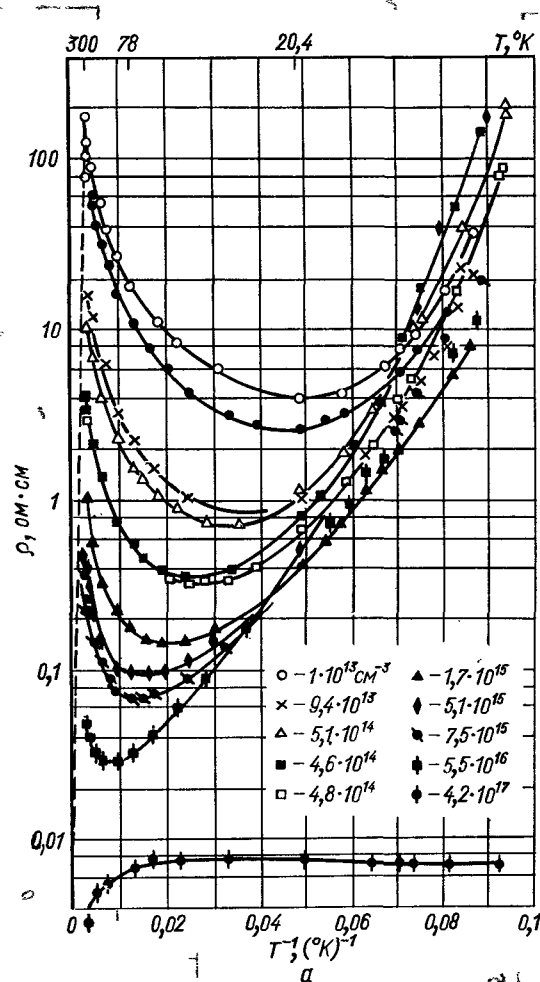


Рис. 21.22. Зависимость удельного сопротивления ρ (а) и постоянной Холла R (б) в n -Ge от температуры при различной эффективной концентрации доноров $N_D - N_A$, см^{-3} [224].

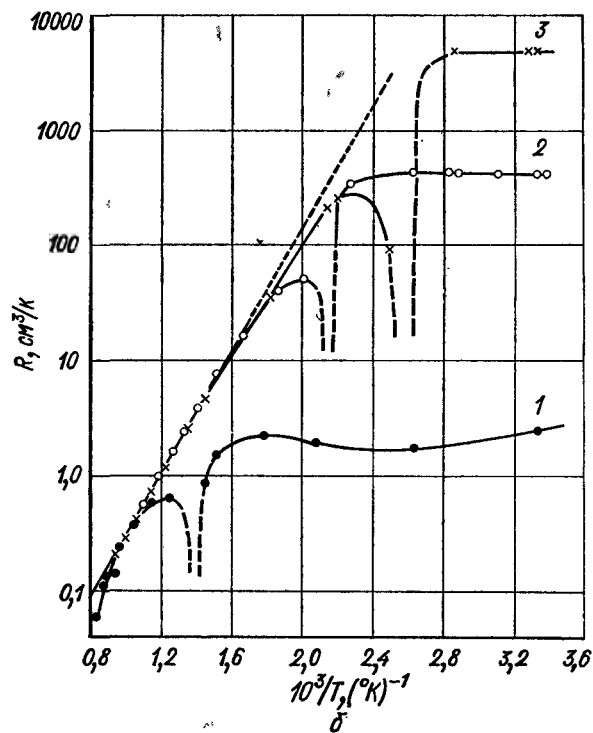
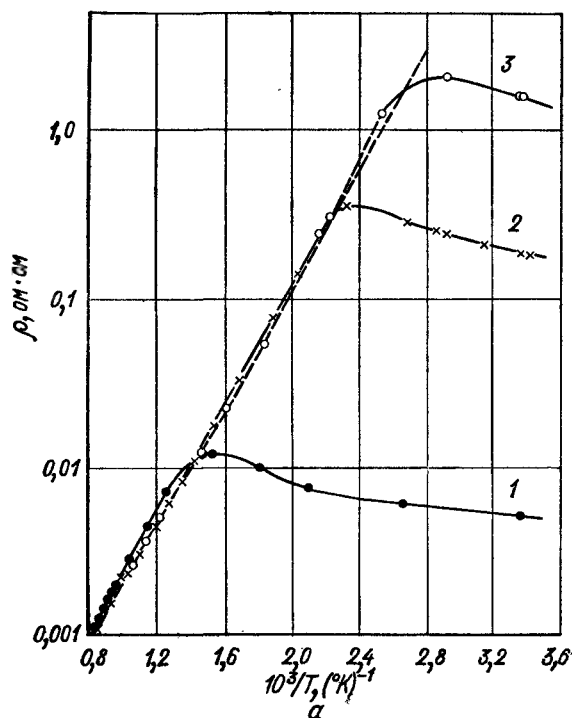


Рис. 21.23. Зависимость удельного сопротивления ρ (а) и постоянной Холла R (б) в p -Ge от температуры [224]. (Измерения проведены на одних и тех же образцах.)

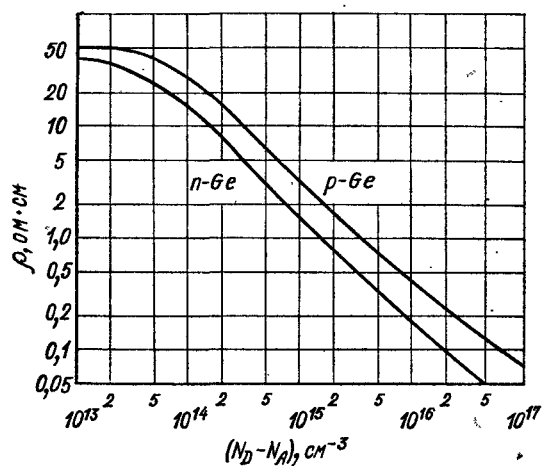


Рис. 21.24. Зависимость удельного сопротивления ρ в p - и n -Ge от концентрации носителей [234].

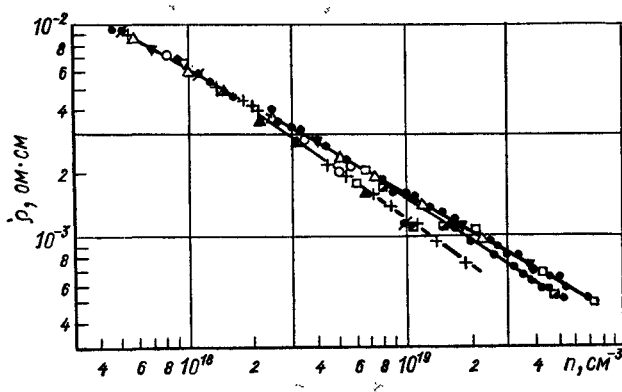


Рис. 21.25. Зависимость удельного сопротивления ρ в сильнолегированном n -Ge от концентрации электронов [225].

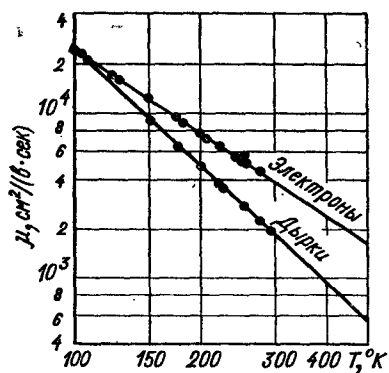


Рис. 21.26. Зависимость подвижностей электронов и дырок в чистом Ge от температуры [222].

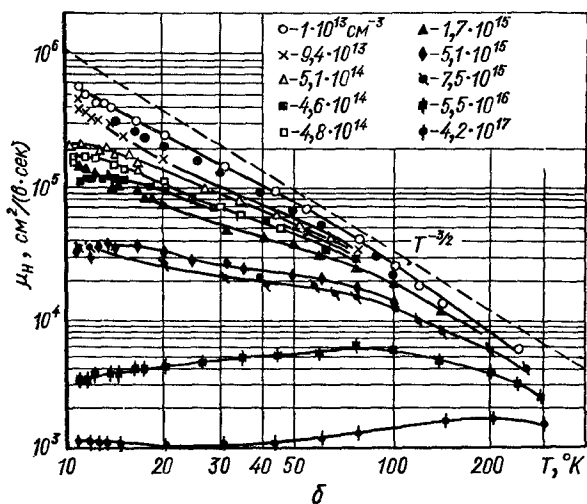
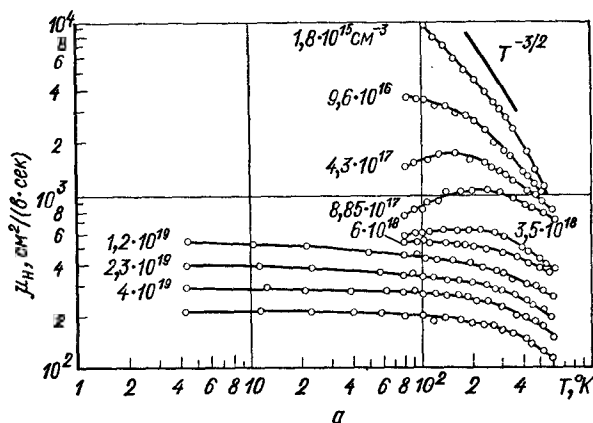


Рис. 21.27. Зависимость холловской подвижности μ_n электронов n -Ge от температуры [225, 224] при различной концентрации доноров: a — указана концентрация As, b — образцы те же, что и на рис. 21.22.

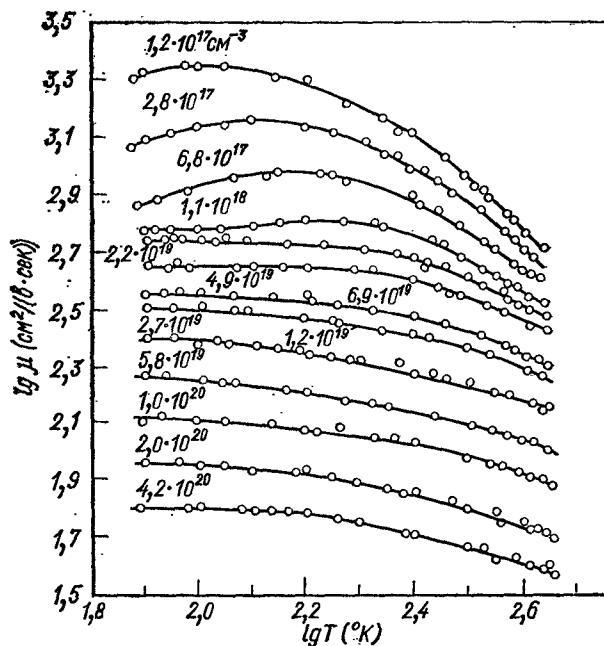


Рис. 21.28. Зависимость подвижности дырок p -Ge от температуры [225] при различной концентрации акцепторов (Ga).

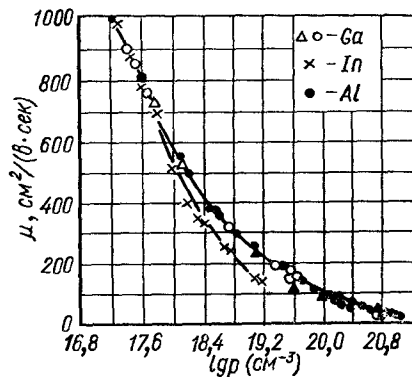


Рис. 21.29. Зависимость подвижности дырок в p -Ge при $T = 300^\circ \text{K}$ от концентрации дырок с различной легирующей примесью [225].

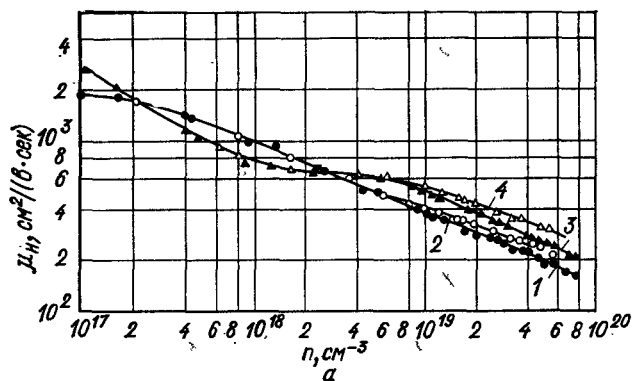


Рис. 21.30. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов в n -Ge от концентрации электронов в сильнолегированных образцах (а) [225] и при $T=300^\circ\text{K}$ (б).

Электрофизические свойства

Элемент	Кристаллическая структура		Литература	$\rho, \frac{г}{см^3}$	Литература	$T_{пл}, ^\circ K$	Литература	$T_D, ^\circ K$		
	Тип	$a, \text{ \AA}$								
Si	Кубическая O_h^7	$a = 5,431$	[123]	2,33	[123]	1690	[123]	539 (80°K); 689 (300°K)		
Ge	Кубическая O_h^7	$a = 5,657$	[123]	5,32	[123]	1210	[123]	353 (80°K); 406 (300°K)		
Элемент	$E_g, эв$	Литература	$E_{Г\Delta}, эв$	Литература	$E_{Г\Lambda}, эв$	Литература	$\Delta_{SO}, эв$	Литература		
Si	1,15	[84; 123]	2,3	[84]	1,5	[84]	0,035 0,044	[117] [123]		
Ge	0,744	[84, 123]	0,05 0,15	[123] [84]	0,02	[123]	0,28 0,30	[117] [123]		
Элемент	m_n/m_0	Литература	$\frac{m_{dn}}{m_0}$	Литература	$\frac{m_{no}}{m_0}$	Литература	$\frac{m_{p1}}{m_0}$	Литература	$\frac{m_{pz}}{m_0}$	Литература
Si	$m_{ } = 0,9163$ $m_{\perp} = 0,1905$	[84] [84]	0,33	[117]	0,26	[117]	0,528*	[123]	0,16	[123]
Ge	$m_{ } = 1,588$ $m_{\perp} = 0,0815$	[84] [84]	0,22	[117]	0,12	[117]	0,346*	[123]	0,043	[123]

* $\lambda, \text{см}^{-1}/(\text{см} \cdot \text{град})$: 2,5 ($T = 200^\circ\text{K}$); 13 ($T = 50^\circ\text{K}$); 17 ($T = 20^\circ\text{K}$); 12 ($T = 10^\circ\text{K}$) [132].
 ** $\lambda = 1,05 \text{ мкм}$.
 *** $\lambda = 8 \text{ мм}$.

[227]: Номера кривых соответствуют разным температурам и примесям.

$T, ^\circ K$	As	P
78	3	4
300	1	2

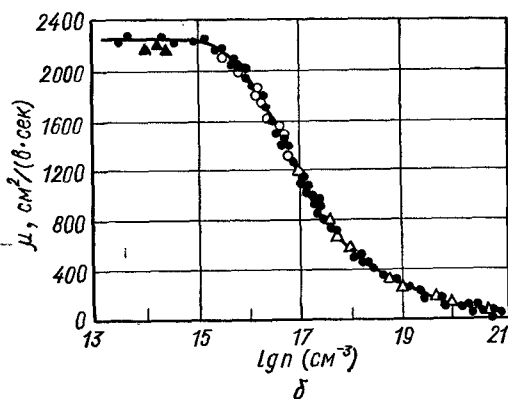


Таблица 21.3

кремния и германия

Литература	$\chi, \frac{вт}{см \cdot град}$	Литература	$\eta_{\infty}, \%$	Литература	ξ_0	Литература	ϵ_{∞}	Литература	
[117] [117]	1,3*	[117]	0,063	[123]	11,7	[28]	12,72* 13,73*	[28] [117]	
[117] [117]	0,634*	[147]	0,037	[123]	16	[28]	16,55*	[28]	
$\frac{dE_g}{dT}, \frac{эв}{град}$	Литература	$\frac{dE_{\Gamma\Lambda}}{dT}, \frac{эв}{град}$	Литература	$\frac{dE_g}{dP}, \frac{эв}{бар}$	Литература	$\frac{dE_{\Gamma\Lambda}}{dP}, \frac{эв}{бар}$	Литература	$\frac{dE_{\Gamma\Lambda}}{dP}, \frac{эв}{бар}$	Литература
—4	[123]	—	[123]	—1,5	[123]	—	—	—	—
—4	[123]	—4	[123]	+5	[123]	7	[123]	—(12—14)	[123]
m_{03}/m_0	Литература	$\nu_n, \frac{см^2}{э \cdot сек}$	Литература	$\nu_p, \frac{см^2}{э \cdot сек}$	Литература	$n_i, \frac{1}{см^3}$	Литература	$\rho_i, см \cdot см$	Литература
0,25	[123]	1300(300°K) ($\sim T^{-2,6}$)	[123] [117]	500(300°K) ($\sim T^{-2,3}$)	[123] [117]	$1,4 \cdot 10^{16}$	[11]	$2,3 \cdot 10^5$	[11]
0,08	[123]	3800(300°K) ($\sim T^{-2,3}$)	[123] [28]	1820(300°K) ($\sim T^{-1,67}$)	[123] [28]	$2,4 \cdot 10^{19}$	[11]	47	[11]

** $\chi, вт/(см \cdot град)$: 1 ($T = 200^\circ K$); 5,5 ($T = 50^\circ K$); 11 ($T = 20^\circ K$); 10 ($T = 10^\circ K$); 0,5 ($T = 2^\circ K$) [132].

** $\lambda = 2,5 мкм$.

** В Si $m_{dp} = 0,55 m_0$, в Ge $m_{dp} = 0,39 m_0$ [11].

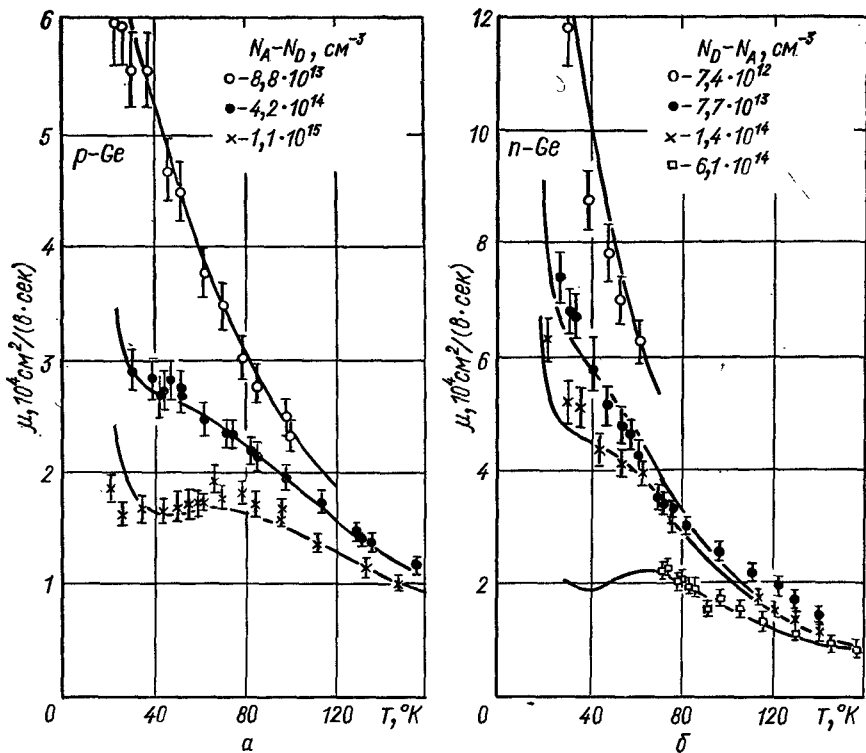


Рис. 21.31. Зависимость дрейфовой подвижности μ неосновных носителей в Ge от температуры [222].

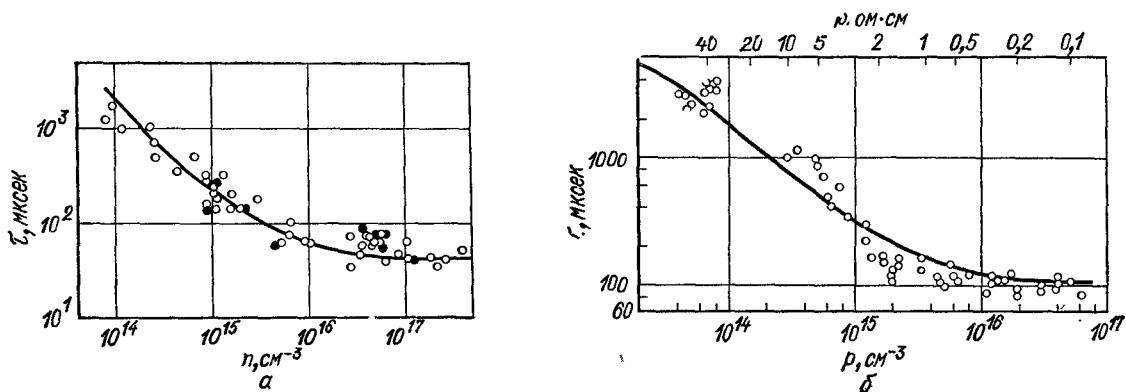


Рис. 21.32. Зависимость времени жизни τ дырок в n -Ge от концентрации электронов n (а) и времени жизни электронов в p -Ge от концентрации дырок p (б) [237].

Свойства примесей в кремнии [117]

Примесь	Al	As	Au	B	Bi	Cu
Тип*	A	D	A	A	D	A
E_i^{2*} , эВ	0,057	0,049	0,35; 0,67	0,046	0,069	0,24; 0,72
Примесь	Fe	Ga	In	Li	O	P
Тип*	A	A	A	D	D	D
E_i^{2*} , эВ	0,4; 0,66	0,065	0,16	0,033	0,03— 0,06	0,044
Примесь	S	Sb	Tl	Zn		
Тип*	D	D	A	A		
E_i^{2*} , эВ	0,18; 0,37	0,039	0,26	0,31; 0,66		

* D — донор, A — акцептор.

** Для доноров энергия ионизации E_i отсчитывается от дна зоны проводимости, для акцепторов — от края валентной зоны.

Таблица 21.5

Свойства примесей в германии [117, 123]

Примесь	Al	Ag	As	Au	B	Be
Тип*	A	A	D	A**	A	A
E_i^{2*} , эВ	0,0102	0,13; 0,5; 0,7	0,0127	0,16 0,59; 0,75	0,0104	0,07
Примесь	Bi	Cd	Co	Cr	Cu	Fe
Тип*	D	A	A**	A	A	A
E_i^{2*} , эВ	0,012	0,05; 0,15	0,09; 0,25; 0,48	0,07; 0,12	0,4; 0,33; 0,53	0,35; 0,52

Примесь	Ga	In	Li	Mn	Ni	O
Тип*	A	A	D	A	D	D
E_i^{2*} , эВ	0,0108	0,0112	0,0093	0,16; 0,42	0,22; 0,49	0,01
Примесь	P	Pt	S	Sb	Se	Te
Тип*	D	A	D	D	D	D
E_i^{2*} , эВ	0,012	0,04; 0,20; 0,67	0,18	0,0096	0,014; 0,28	0,11 0,30
Примесь	Tl			Zn		
Тип*	A			A		
E_i^{2*} , эВ	0,01			0,03; 0,09		

* D — донор, A — акцептор.

** Энергия ионизации E_i для доноров отсчитывается от дна зоны проводимости, для акцепторов — от края валентной зоны.

** Известны гомонный уровень 0,74 эВ для Au, 0,7 эВ для Co.

21.4. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Соединения типа $A^I B^I - A^I B^{VII}$

Полупроводниковые соединения $A^I B^I$. Известны два полупроводниковых соединения этого типа: NaAu и CsAu, для которых E_g равно соответственно 0,15 и 0,5—2,0 эВ [242].

Полупроводниковые соединения $A^I B^V$. При взаимодействии щелочных металлов с элементами V группы образуются соединения двух типов $A^I B^V$ и $A_3^I B^V$.

Тип проводимости определяется нарушением стехиометрии. Избыток щелочного металла создает донорные, а элементы V группы — акцепторные уровни. Растворимость примесей в этих соединениях мала. Соединения рассматриваемого типа или их сплавы используются в качестве фотокатодов [61].

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $A^I B^V$

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Литература	$T_{пл}, ^\circ\text{K}$	Литература	$E_g, \text{эВ}$	Литература	$\mu_n, \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{сек}}$	Литература	$\mu_p, \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{сек}}$	Литература	Тип проводимости	Литература
	Тип	$a, b, c, \text{\AA}$													
Li_3Sb^*	Кубическая O_h^5	$a=6,56$	[1]	—	—	1423—1573	[16]	1,25	[16]	—	—	—	—	p	[16]
NaSb	Моноклинная C_{2h}^5	$a=6,80$ $b=6,34$ $c=12,48$	[16, 242]	—	—	738	[16]	0,82	[16]	—	—	—	—	p	[16]
Na_3Sb	Гексагональная D_{6h}^4	$a=5,36$ $b=9,5$	[1] [1]	2,67	[123]	1130	[123]	1,1	[81, 123]	—	—	—	—	p	[16]
KSb	Моноклинная C_{2h}^5	$a=7,18$ $b=6,97$ $c=13,40$	[242] [242] [242]	—	—	878	[16]	0,9	[16]	—	—	—	—	—	—
K_3Sb	Гексагональная D_{6h}^4	$a=6,03$ $b=10,69$	[1] [1]	2,35	[123]	1085	[123]	1,1	[10, 123]	—	—	—	—	n	[16]
Rb_3Sb	Кубическая	—	[61]	—	—	—	—	1,0	[10]	—	—	—	—	p	[61]
CsSb	—	—	—	—	—	—	—	0,8	[10]	500 ($\sim T^{-3/2}$)	[16]	100	[16]	—	—
Cs_3Sb	Кубическая O_h^7	$a=9,147$ ↓	[1]	—	—	—	—	1,6	[8, 123]	500 ($\sim T^{-3/2}$)	[10]	10	[10]	p	[16]
CsBi_2	—	—	—	—	—	—	—	1,65	[97]	—	—	—	—	—	—
Cs_3Bi	Кубическая O_h^7	$a=9,305$	[242]	—	—	—	—	0,55	[16]	—	—	350	[249]	n	[16]

* Данные относятся к $\beta\text{-Li}_3\text{Sb}$ [242]; имеется другая модификация $\alpha\text{-Li}_3\text{Sb}$ с гексагональным типом решетки D_{6h}^4 , $a=4,710\text{\AA}$; $b=8,3236\text{\AA}$, $E_g \sim 0,5 \pm 0,8 \text{ эВ}$ (300°K) [242].

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $A_2^I V^V$

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	$\frac{\rho}{\text{см}^3}$	Литература	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{K}$	Литература	$E_g, \text{ эВ}$	Литература	$\frac{\rho_{\text{H}}}{\text{см}^2}$ в-сек	Литература	$\frac{\rho_{\text{H}}}{\text{см}^2}$ в-сек	Литература	Примечания	Литература
	Тип	$a, b, c, \text{ \AA}$													
CuO	Моноклинная C_{2h}^6	$a = 4,662$ $b = 3,417$ $c = 5,118$	[242] [242] [242]	—	—	—	—	—	—	0,26	[242]	—	—	—	—
Cu_2O	Кубическая O_h^4	$a = 4,26$	[1]	6,1	[123]	1508	[16]	$\sim 1,5$ 2,0 2,17	[249] [123] [19]	—	—	100 $80(T^{-5/2})$	[123] [16]	$\frac{dE_g}{dT} = -2 \times$ $\times 10^{-4} \frac{\text{эВ}}{\text{град}}$ $\epsilon = 8,75$ $\alpha = 700 \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$ $p\text{-тип}$ $\epsilon_0 = 7,5$	[10] [179] [16] [16] [23]
Cu_2S	Ромбическая C_{2v}^{15}	$a = 11,8$ $b = 27,28$ $c = ?$	[1] [1] [1]	5,6	[216]	1373	[216]	1,85	[94]	30	[242]	—	—	$p\text{-тип}$	[16]
Cu_2Se	Кубическая T_d^2	$a = 5,84$	[1]	6,8	[216]	1390	[216]	1,25	[94]	—	—	750	[16]	$p\text{-тип}$	[16]
Cu_2Te	Гексагональная D_{6h}^1	$a = 4,2$ $c = 7,2$	[1] [1]	7,34	[216]	~ 1173 ±	[216]	1,0	[88]	200	[40]	900 $(T^{-3/2})$	[88]	—	—
$\alpha\text{-Ag}_2\text{S}$	Кубическая O_h^5	—	[74]	—	—	—	—	0,6 (300°K)	[74]	—	—	—	—	При $T < 453^\circ\text{K}$ переходит в $\beta\text{-Ag}_2\text{S}$: $m_n = 0,24 m_0$, $\sigma \sim 10^2 \text{ ом} \cdot \text{см}$ ($T = 200^\circ\text{K}$)	[74]
$\beta\text{-Ag}_2\text{S}$	Ромбическая C_{2h}^5	$a = 9,47$ $b = 6,92$ $c = 8,28$	[1] [1] [1]	7,33	[216]	1111	[16]	1,3 (0°K) 1,0 (300°K) 1,2 (0°K)	[16] [123]	50 63 (100°K)	[16] [123]	19 (100°K)	[123]	$m_{dn} = 4,55 m_0$ $m_{dp} = 7,8 m_0$ $n\text{-тип}$	[15] [15] [16]

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	$\frac{\rho}{\text{см}^3}$	Литература	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{K}$	Литература	$E_g, \text{ эВ}$	Литература	$\frac{1}{v} \frac{n^2}{\text{см}^2}$ в·сек	Литература	$\frac{1}{v} \frac{p^2}{\text{см}^2}$ в·сек	Литература	Примечания	Литература
	Тип	$a, b, c, \text{ \AA}$													
$\alpha\text{-Ag}_2\text{Te}$	Кубическая O_d^3	$a = 6,57$	[1]	8,5	[216]	1228	[216]	0,17	[16]	4000	[16]	—	—	При $T \leq 423^\circ\text{K}$ переходит в $\beta\text{-Ag}_2\text{Te}$	[16]
$\beta\text{-Ag}_2\text{Te}$	Моноклинная C_{2h}^1	$a = 6,57$ $b = 6,14$ $c = 6,10$	[1] [1] [1]	—	—	При $T \geq 423^\circ\text{K}$ переходит в $\alpha\text{-Ag}_2\text{Te}$	[16]	0,064	[102]	8400 См. рис. 21.33	[102]	1400	[102]	$m_{dn} = 0,4 m_0$ $dE_g/dT = -0,86 \times 10^{-4} \text{ эВ/град}$ $\hbar\omega_e = 0,015 \text{ эВ}$	[15] [102] [98]
$\beta\text{-Ag}_2\text{Se}^*$	Ромбическая Тетрагональная	— $a = 7,06$ $c = 4,98$	[16, 123] [242] [242]	—	—	1170 ($T_{\text{пл}}$ $\alpha\text{-Ag}_2\text{Se}$)	[16]	0,075	[15]	2000	[16, 123]	505	[123]	При $T \geq 406^\circ\text{K}$ переходит в $\alpha\text{-Ag}_2\text{Se}$ $m_p = 0,54 m_0$ $m_n = 0,2 m_0$ $n\text{-тип}$	[16] [123] [256] [16]
Na_2Se	Кубическая O_h^5	$a = 6,813$	[242]	—	—	—	—	2,0—2,4	[242]	—	—	—	—	—	—
Na_2Te	—	—	—	—	—	1226	[216]	2,3	[72]	—	—	—	—	—	—
K_2Se	Кубическая O_h^5	$a = 7,692$	[242]	—	—	—	—	1,8—2,0	[242]	—	—	—	—	—	—

* $\alpha = 10 \cdot 10^{-3} \text{ ат/(см·град)}$ при $T = 300^\circ\text{K}$ ($n \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$); $\sigma \sim 6000 \text{ ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ($T = 300^\circ\text{K}$) [104].

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $Al^{VI} B^{VII}$

Соединения	Кристаллическая структура		Литература	ρ $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Литература	$T_{пл}$ °K	Литература	E_g , эв	Литература	$\frac{1}{\nu \cdot \text{сек}}$	Литература	$\frac{1}{\nu \cdot \text{сек}}$	Литература	Примечание	Литература
	Тип	a , Å													
CuBr	Кубическая T_d^2	5,68	[1]	4,72	[121]	777	[121]	2,9	[16]	30	[16, 190]	—	—	$\chi = 0,013 \frac{\text{вт}}{\text{см} \cdot \text{град}}$	[121]
CuI	Кубическая O_h^5	6,053; 6,15	[242] [242]	5,63	[242]	878	[242]	2,8	[242]	—	—	—	—	$m_{p\perp} = 0,52 m_0$; $m_{p\parallel} = 1,25 m_0$	[82]
AgCl	Кубическая O_h^5	5,54	[1]	5,56	[216]	728	[216]	4,1 3,0	[11] [242]	См. рис. 21.34 70 (200°K) 45 000 (12°K)	[11] [110]	40 (200°K)	[11]	$T_D = 280^\circ\text{K}$ $m_n = 0,36 m_0$ $\frac{dE_g}{dT} = -10,2 \times 10^{-4} \frac{\text{эв}}{\text{град}}$	[187] [110] [10]
AgBr	Кубическая O_h^5	5,77	[1]	6,47	[216]	703	[216]	2,0	[78]	240 4000 $6 \cdot 10^5$ (1,7°K)	[10] [123] [82]	$1,5 \cdot 10^5$ (1,7°K)	[82]	$T_D = 210^\circ\text{K}$ $m_n^* = 0,23 m_0$	[187] [123]
AgI	Кубическая T_d^2	6,47	[1]	5,67	[121]	825	[121]	2,8	[10]	50	[16]	—	—	$T_D = 119^\circ\text{K}$	[121]

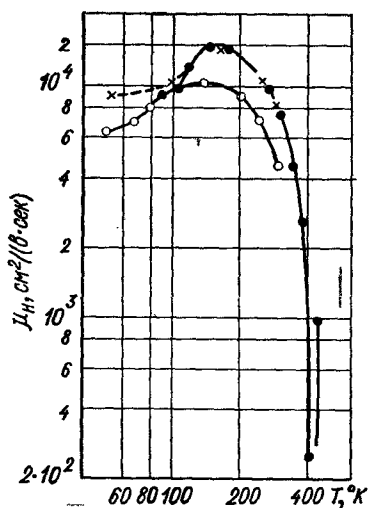


Рис. 21.33. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов в Ag_2Te от температуры [123]:

○, × — массивные кристаллы; ● — тонкие слои толщиной $1350 \text{ \AA}$ со сферолитической структурой, напыляемые на подложку при температуре 120°C .

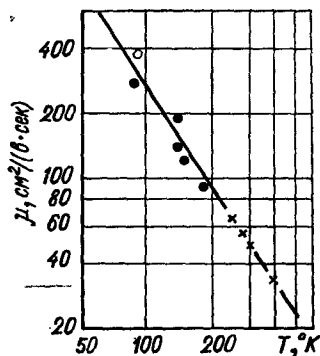


Рис. 21.34. Зависимость подвижности электронов в AgCl от температуры [10]:

○ — данные измерений холловской подвижности; ● — данные измерений дрейфовой подвижности; × — данные, полученные по эффекту «отпечатывания».

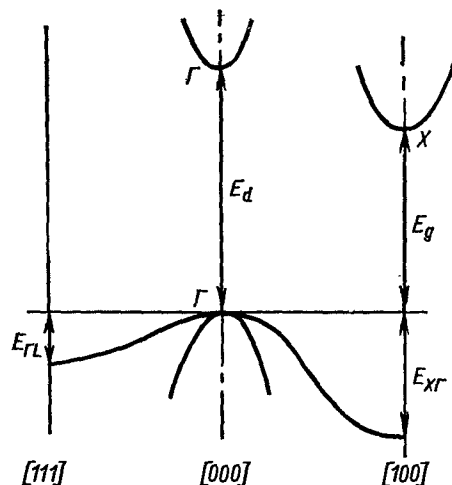


Рис. 21.35. Зонная структура Mg_2Si , Mg_2Ge , Mg_2Sn [123, 129, 130, 246] ($E_{GL} = 0,5 \text{ эВ}$, $E_{XT} = 2,3 \text{ эВ}$):

E , эВ	Mg_2Si	Mg_2Ge	Mg_2Sn
E_g	0,77	0,69; 0,57	0,35
E_d	0,06	1,49	1,06

Соединения типа $\text{A}^{\text{II}} \text{B}^{\text{IV}} - \text{A}^{\text{II}} \text{B}^{\text{VI}}$

Полупроводниковые соединения типа $\text{A}_2^{\text{II}} \text{B}^{\text{IV}}$

Среди полупроводников этой группы наиболее изучены соединения типа Mg_2X . Зонная структура этих соединений имеет вид, показанный на рис. 21.35: $E_{GL} = 0,5 \div 0,8 \text{ эВ}$, $E_{XT} = 2,3 \text{ эВ}$ для всех полупроводников этого типа [129, 130]

Таблица 21.9

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $\text{A}_2^{\text{II}} \text{B}^{\text{IV}}$

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	$T_{пл}, ^\circ\text{K}$	Литература	$\rho, \frac{\text{см}^2}{\text{см}}$	Литература	E_g , эВ	Литература	$\frac{dE_g}{dT}, 10^{-4} \frac{\text{эВ}}{\text{град}}$	Литература	$\mu_n, \frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$	Литература
	Тип	$a, b, c, \text{\AA}$											
Mg_2Si	Кубическая O_h^5	$a=6,34$	[123]	1375	[123]	1,95	[123]	0,77	[123]	-6,4	[131]	400 ($\sim T^{-2,5}$) при $T > 160^\circ\text{K}$	[123]
Mg_2Ge	Кубическая O_h^5	$a=6,38$	[123]	1388	[123]	3,086	[123]	0,57 0,69	[67] [246]	-1,8 -6,5	[67] [247]	500 ($\sim T^{-2}$)	[123, 242]
Mg_2Sn	Кубическая O_h^5	$a=6,76$	[123]	1051	[123]	3,592	[123]	0,28— —0,34 0,35	[244] [123, 245]	-3,2 -4,2 -3,5 ($85^\circ\text{K} < T < 300^\circ\text{K}$)	[245] [123] [244]	320 ($T^{-2,2}$)	[123]

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	$T_{пл}, ^\circ K$	Литература	$\rho, \frac{г}{см^3}$	Литература	$E_g, эв$	Литература	$\frac{dE_g}{dP}, 10^{-4} \frac{эв}{гбар}$	Литература	$\mu_p, \frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература
	Тип	$a, b, c, \text{\AA}$											
Mg_2Pb	Кубическая O_h^5	$a=6,80$	[123]	923	[123]	—	—	0,1	[123]	—	—	—	—
Ca_2Si	Ромбическая D_{2h}^{16}	$a=7,667$ $b=4,799$ $c=9,002$	[242] [242] [242]	1182	[6]	—	—	1,9	[16, 249]	—	—	—	—
Ca_2Ge	Ромбическая D_{2h}^{16}	$a=7,734$ $b=4,834$ $c=9,069$	[242] [242] [242]	—	—	—	—	1,0	[242]	—	—	—	—
Ca_2Sn	Ромбическая D_{2h}^{16}	—	[242]	1395	[6]	—	—	0,9	[16, 249]	—	—	—	—
Ca_2Pb	Ромбическая D_{2h}^{16}	$a=8,072$ $b=5,100$ $c=9,647$	[242] [242] [242]	1382	[71]	—	—	0,46	[16, 249]	—	—	—	—

Продолжение табл. 21.9

Соединение	$\mu_p, \frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	m_p/m_0	Литература	m_n/m_0	Литература	$T_D, ^\circ K$	Литература	Примечания	Литература
Mg_2Si	70	[123]	0,87	[10]	$m_d/m_0=0,46$	[75]	417 (300°K) 542 (20°K)	[24] [24]	$\chi=0,08 \frac{вт}{см \cdot град}$ $\alpha=600 \div 2000 \frac{мкв}{град}$	[243] [16]
$M_{1/2}Ge$	100	[123]	0,31	[10]	$m_d/m_0=0,18$	[55]	363 (300°K) 466 (5°K)	[261] [261]	$\chi=0,1 \frac{вт}{см \cdot град}$	[132]
Mg_2Sn	$200 (T^{-2,2})$	[11, 123]	$m_d=1,3m_0$ $m_\sigma=0,1 m_0$ 1,28	[245] [10]	$m_d/m_0=1,2$ $m_\sigma/m_0=$ $=0,15$ $m_{ }/m_0=0,8$ $m_{\perp}/m_0=0,3$	[245] [133]	240 (300°K) 336 (5°K)	[262] [262]	$\epsilon_0=23,75$ $\epsilon_\infty=15,5$ $\frac{dE_g}{dP}=4,4 \cdot 10^{-6} \frac{эв}{бар}$ $n_i=2,7 \cdot 10^{17} \frac{1}{см^3}$ $\chi=0,1 \frac{вт}{см \cdot град}$	[219] [219] [123] [11] [132]

Полупроводниковые соединения типа $A^{II}B^V$

Из соединений этого типа наиболее изучены $ZnSb$ и $CdSb$, а также их твердые растворы, представляющие интерес при создании термоэлектрических устройств. $ZnSb$ и $CdSb$ кристаллизуются в орторомбической структуре (D_{2h}^{15}), приводящей к сильной анизотропии их механических и электрических свойств. Зонная структура

— не прямая [18, 117]. Минимум зоны проводимости расположен в центре зоны Бриллюэна (при $k = 0$). Вблизи него поверхность постоянной энергии близка к эллипсоиду вращения с большой осью, направленной вдоль оси a . Экстремум валентной зоны расположен в точке $k \neq 0$. Обзор свойств соединений $A^{II}B^V$ см. в работе [241].

Рис. 21.36—21.39 иллюстрируют электрофизические свойства некоторых соединений рассматриваемого типа.

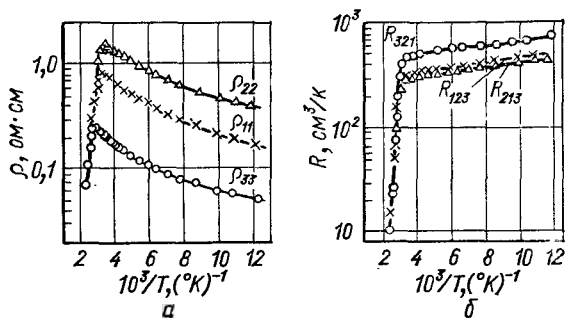


Рис. 21.36. Зависимость от температуры удельного сопротивления ρ (а) и постоянной Холла R (б) для трех основных направлений в p - $ZnSb$ [241] и зависимость холловской подвижности μ_H дырок в p - $ZnSb$ (в) [217].

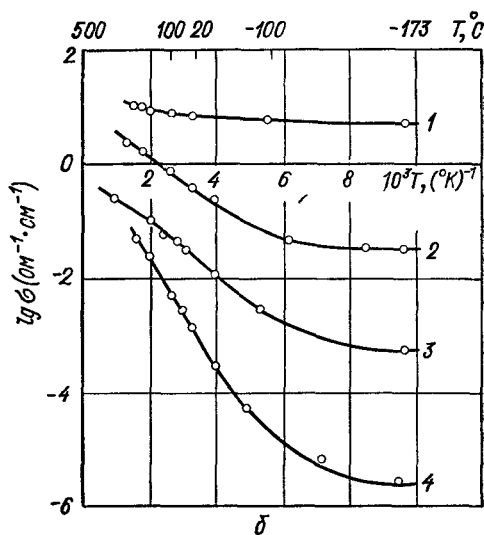
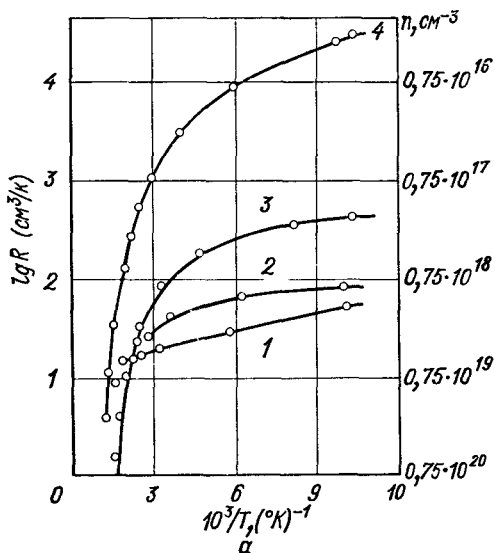
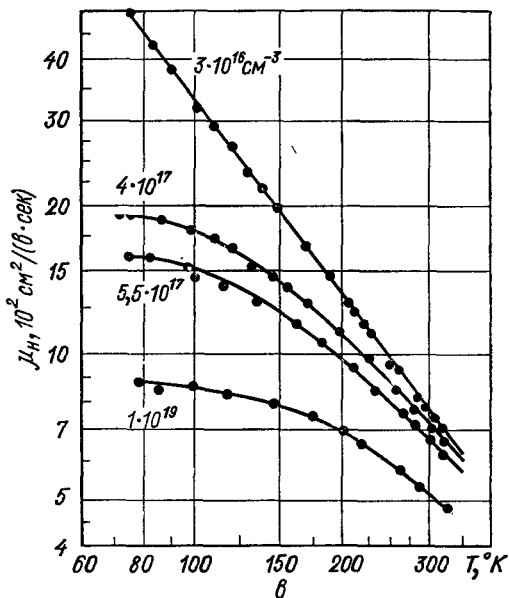


Рис. 21.37. Зависимость от температуры постоянной Холла R (а) и удельной проводимости σ (б) в Mg_3Sb_2 . Образцы с различной степенью отклонения от стехиометрии (1—4) [16].

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	$\rho, \frac{\text{ом}}{\text{см}^3}$	Литература	$T_{\text{пл}}, \text{°K}$	Литература	Тип проводимости	Литература	$E_g, \text{эВ}$	Литература	$\frac{\partial E_g}{dT}, 10^{-4} \frac{\text{эВ}}{\text{град}}$	Литература	$\alpha, \frac{\text{см}^{-1}}{\text{см} \cdot \text{град}}$	Литература
	Тип	$a, b, c, \text{Å}$													
Be_3Sb_2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,67	[242]	—	—	—	—
Mg_3Sb_2	Тригональная D_{3d}^3	$a = 4,54$ $c = 7,23$	[1] [1]	4,09	[123]	1500	[123]	—	—	0,82	[151]	—	—	—	—
Ca_3Sb_2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,4	[16]	—	—	—	—
ZnP_2	Тетрагональная D_4^{8*}	$a = 5,07$ $c = 18,65$	[241] [241]	3,47— —3,55	[248]	—	—	p	[248]	2,05	[248]	—	—	—	—
Zn_3P_2	Тетрагональная D_{4h}^{15}	$a = 8,1$ $c = 11,45$	[2] [2]	4,54	[16]	1450	[248]	n, p	[16]	1,15	[10]	—	—	—	—
ZnAs_2	Моноклинная ^{2*} C_{2h}^5	$a = 7,72$ $b = 7,99$ $c = 36,28$	[1] [1] [146]	5	[248]	1041	[133]	p	[133]	0,92	[16]	—	—	—	—
Zn_3As_2	Тетрагональная D_{4h}^{15*}	$a = 8,32$ $c = 11,76$	[1] [1]	5,58	[123]	1288	[133]	p	[133]	1,0	[10]	—	—	0,09	[248]
ZnSb	Орторомбическая D_{2h}^{15}	$a = 6,22$ $b = 7,74$ $c = 8,12$	[117] [117] [117]	6,38	[117]	819	[117]	p	[133]	0,5 (300°K) 0,59 (77°K) 0,61 (4,2°K)	[103] [103] [103]	—	—	0,01	[117]
Zn_3Sb_2	—	—	—	—	—	839	[16]	p	[16]	0,2	[16]	—	—	$4,3 \cdot 10^{-2}$	[242]
Zn_4Sb_3	Моноклинная	$a = 10,74$ $b = 12,20$ $c = 8,20$	[16] — [241]	—	—	836	[242]	p	[16]	1,2	[16]	—	—	—	—

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Литература	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{К}$	Литература	Тип проводимости	Литература	$E_g, \text{эВ}$	Литература	$\frac{\partial E_g}{dT}, 10^{-4} \frac{\text{эВ}}{\text{град}}$	Литература	$\chi, \frac{\text{вт}}{\text{см} \cdot \text{град}}$	Литература
	Тип	$a, b, c, \text{\AA}$													
CdP_2	Тетрагональная D_4^8	$a = 5,28$ $c = 19,70$	[241] [241]	4,18	[248]	—	—	—	—	1,93 2,02	[242] [248]	—	—	—	—
CdP_3	Моноклинная C_{2h}^5	$a = 5,27$ $b = 5,19$ $c = 7,66$	[111] [111] [111]	3,90	[248]	—	—	p	[248]	1,0	[111]	—	—	—	—
Cd_3P_2	Тетрагональная D_{4h}^{15}	$a = 8,75$ $c = 12,22$	[1] [1]	5,60	[123]	970	[123]	n	[248]	0,55	[54]	—	—	—	—
CdAs_2 —	Тетрагональная D_4^{10}	$a = 7,953$ $c = 4,675$	[16] [241]	—	—	894	[133]	n	[133]	1,13 1,0	[16] [15]	—	—	0,41	[248]
Cd_3As_2	Тетрагональная D_{4h}^{15A*}	$a = 8,95$ $c = 12,28$	[1] [1]	6,25	[123]	994	[133]	n	[133]	0,14 0,13	[76] [123]	—5,8	[76]	0,03 (100°K)	[134]
CdSb	Орторомбическая D_{2h}^{15}	$a = 6,47$ $b = 8,24$ $c = 8,53$	[117] [117] [117]	6,92	[117]	729	[133]	p^{5*}	[117]	0,5 0,56	[117] [117]	—5,4	[117]	0,011	[117]
Cd_3Sb_2	Моноклинная ^{6*}	$a = 7,20$ $b = 3,51$ $c = 6,16$	[1] [1] [1]	—	—	723	[242]	p	[16]	0,3 0,7	[242] [16]	—	—	—	—
Cd_4Sb_3	Тригональная D_{3d}	$a = 22,45$ $c = 13,04$	[241] [241]	—	—	733	[242]	p^{5*}	[16]	1,25	[16]	—	—	$(0,94-1,9) \times 10^{-2}$	[242]

* Существует также модификация C_{2h}^5 ($a = 8,85 \text{ \AA}$, $b = 7,29 \text{ \AA}$, $c = 7,56 \text{ \AA}$) [241].

* Существует также модификация C_{2h}^5 ($a = 9,28 \text{ \AA}$, $b = 7,68 \text{ \AA}$, $c = 8,03 \text{ \AA}$) [241].

* Существует также модификация D_{4h}^{20} ($a = 11,78 \text{ \AA}$, $c = 23,65 \text{ \AA}$) [241].

* Существуют также модификации D_{4h}^{20} и C_{4v}^{12} ($a = 12,66 \text{ \AA}$, $c = 25,47 \text{ \AA}$) [241].

* Введение ряда примесей приводит к проводимости n -типа [16, 117].

* Существует также модификация C_{4m} ($a = 11,44 \text{ \AA}$, $c = 11,35 \text{ \AA}$) [241].

Соединение	$T_D, ^\circ K$	Литература	m_n/m_1	Литература	m_p/m_1	Литература	$\mu_n, \frac{cm^2}{v \cdot сек}$	Литература	$\mu_p, \frac{cm^2}{v \cdot сек}$	Литература	Примечания	Литература
Be_3Sb_2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mg_3Sb	—	—	$m_d = 3,1 m_0$	[15]	—	—	20	[16]	100 ($\sim T^{-3/2}$) 82	[10] [123]	$\alpha = 600 \text{ мкв/град}$	[16]
Ca_3Sb_2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ZnP_2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Zn_3P_2	—	—	—	—	—	—	—	—	10	[248]	—	—
$ZnAs_2$	—	—	0,345	[248]	2,45	[248]	$\mu_n/\mu_p = 1,6$ $\mu_n/\mu_p = 4$	[242] [248]	50	[16] [133]	—	—
Zn_3As_2	—	—	1,7	[16]	0,65	[16]	10 ($T/300$) ^{-1,1}	[135]	10 17 ($\sim T^{-1,64}$)	[136] [16]	—	—
$ZnSb$	225	[117]	$m_{ } = 0,175 m_0$ $m_{\perp} = 0,146 m_0$	[117] [133] [117]	0,53 $m_d = 0,42 m_0$	[18] [217]	10 60 ($\sim T^{-2,3}$)	[123] [18]	700 ($\sim T^{-3/2}$)	[50]	$\alpha = 800 \text{ мкв/град}$ $n_i = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ μ анизотропия	[117] [18]
Zn_3Sb_2	—	—	—	—	—	—	—	—	200	[16]	Имеется несколько модификаций	[16]
Zn_4Sb_3	—	—	—	—	$\sim 0,1$	[242]	—	—	980	[16]	$\alpha = 157 \text{ мкв/град}$	[16]

Соединение	$T_D, ^\circ\text{K}$	Литература	m_n/m_0	Литература	m_p/m_0	Литература	$\mu_n, \frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$	Литература	$\mu_p, \frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$	Литература	Примечания	Литература
CdP ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CdP ₃	—	—	—	—	—	—	150	[111]	—	—	—	—
Cd ₃ P ₂	—	—	0,09 0,05 0,057	[77] [188] [208]	—	—	3000 ($\sim T^{-1,1}$) 14 000	[54] [208]	—	—	α (300°K) $\sim$ ~ 150 мкв/град α (50°K) $\sim$ ~ 50 мкв/град ρ (300°K) $\approx 3 \times$ $\times 10^{-7}$ ом·см	[208]
CdAs ₂	—	—	$m_{\parallel} = 0,15 m_0$ $m_{\perp} = 0,58 m_0$ $m_d = 0,37 m_0$	[133]	$m_{\parallel} = 0,094 m_0$ $m_{\perp} = 0,346 m_0$ $m_d = 0,22 m_0$	[133] [120] [120]	$\parallel$ ось a 100 $\parallel$ оси c 400 300	[133] [133] [123]	400	[123]	—	—
Cd ₃ As ₂	—	—	$m_d = 0,046 m_0$ $m_1 = 0,012 m_0$ $m_2 = 0,2 m_0$	[52] [137] [137]	0,12	[242]	18 000 30 000 (100°K) 60 000 (1,5°K) $\mu_1 = 13 500$ * $\mu_2 = 2 500$	[16] [134] [134] [137] [137]	430	[16]	Зона проводимости состоит из двух подзон с энер- гетическим за- зором $\Delta E = 0,4$ эв $\Delta E = 0,15-4,5 \times$ $\times 10^{-4} T$ эв	[137] [136]
CdSb	180	[117]	$m_{\parallel} = 0,14 m_0$ $m_{\perp} = 0,159 m_0$	[133] [117]	$m_p = (0,1 \div$ $\div 0,2) m_0$ $m_p = (0,3 \div$ $\div 0,35) m_0$	[135] [242]	$\mu_a = 2,1 \times$ $\times 10^6 T^{-1,5}$ $\mu_b = 1,7 \times$ $\times 10^6 \cdot T^{-1,5}$ $\mu_c = 2,2 \times$ $\times 10^6 \cdot T^{-1,5}$ a, b, c — кристал- лографические на- правления 300 350 660 (297)°K	[91] [91] [91] [135] [123] [242]	$\mu_a = 7,15 \cdot 10^5 \times$ $\times T^{-1,4}$ $\mu_b = 1,13 \cdot 10^5 \times$ $\times T^{-1,1}$ $\mu_c = 8,57 \cdot 10^5 \times$ $\times T^{-1,3}$ 900—2000 ($\sim$ $\sim T^{-3/2}$)	[91] [91] [91] [117]	Чистые образцы p -типа. При легировании уда- ется получить n -тип $\alpha = 800$ мкв/град	[117]
Cd ₃ Sb ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	120	[242]	—	—
Cd ₄ Sb ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	900	[242]	—	—

* Подвижности легких и тяжелых электронов.

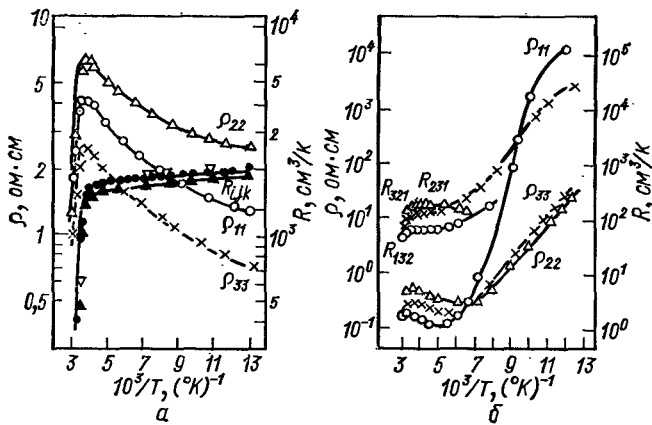


Рис. 21.38. Зависимость от температуры постоянной Холла R и удельного сопротивления ρ для трех основных направлений в p -GdSb и n -GdSb (легирующая примесь Ga) (б) [241].

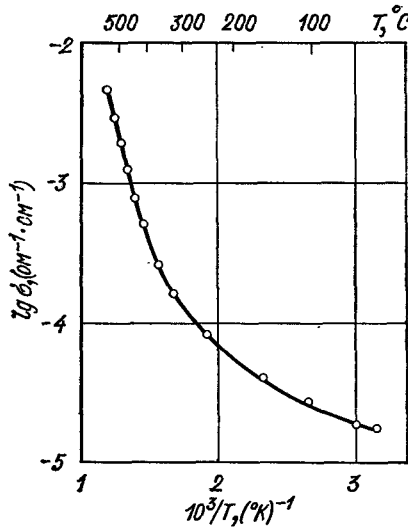


Рис. 21.39. Зависимость удельной проводимости σ в CaSbSb_2 от температуры [16].

Полупроводниковые соединения типа $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$

Все соединения этого типа являются фазами переменного состава. Полиморфизм и политипизм, свойственные многим из них, приводят к сильной зависимости структурно чувствительных свойств от условий выращивания кристалла и термической обработки.

Наиболее изученные полупроводники кристаллизуются в решетках типа сфалерита (T_d^2) или вюрцита (C_{6v}^4) и имеют прямую зонную структуру (экстремумы зоны проводимости и валентной зоны расположены в точке $k=0$). Кристаллы кубической структуры (сфалерит) изотропны; одна из подзон их валентной зоны отщеплена за счет спин-орбитального взаимодействия Δ_{so} (рис. 21.40). Кристаллы гексагональной структуры (вюрцит)

слабо анизотропны (этой анизотропией часто пренебрегают); наличие дополнительного взаимодействия Δ_{cr} (кристаллическое поле некубического кристалла) при-

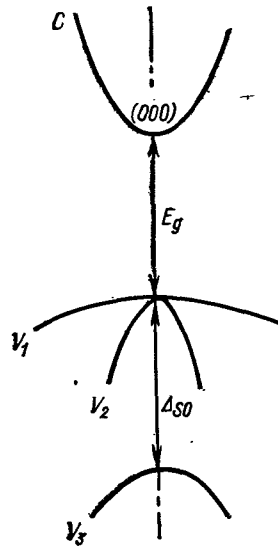


Рис. 21.40. Зонная структура полупроводников типа $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ (сфалерит) [138].

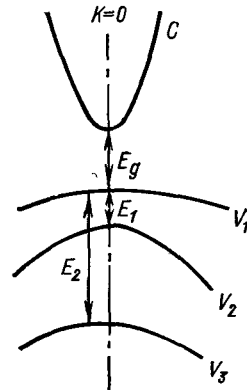


Рис. 21.41. Зонная структура полупроводников типа $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ (вюрцит) [138].

водит к расщеплению валентной зоны на три подзоны (рис. 21.41). Экспериментально определяемые оптическими методами значения расщепления E_1 и E_2 связаны с Δ_{so} и Δ_{cr} соотношениями [138]

$$E_{1,2} = \frac{1}{2} (\Delta_{so} + \Delta_{cr}) \mp \left[\frac{1}{4} (\Delta_{so} + \Delta_{cr})^2 - \frac{2}{3} \Delta_{so} \Delta_{cr} \right]^{1/2}.$$

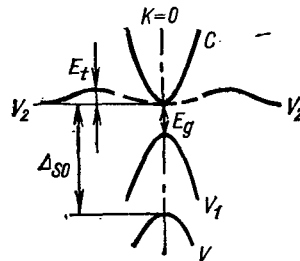


Рис. 21.42. Зонная структура HgSe и HgTe [138, 199, 200].

HgSe и HgTe имеют сложную зонную структуру с перекрывающимися зонами (рис. 21.42). Энергия перекрытия $E_t \sim 0,001$ эВ [199, 200] (по другим данным $E_t = 0,02$ эВ (HgTe); $E_t = 0,07$ эВ (HgSe) [138], $E_t = 0,018$ эВ (HgSe) [112]).

Таблица 21.11

Параметры валентной зоны соединений типа $A^{II} B^{VI}$ [138]

Тип структуры и соединения	$\Delta_{SO},$ эВ	$\Delta_{cr},$ эВ	$E_1,$ эВ	$E_2,$ эВ
Сфалерит				
CdTe	0,8; 0,9	—	—	—
HgSe	0,45*	—	—	—
HgTe	1,1	—	—	—
ZnS	0,072	—	—	—
ZnSe	0,43	—	—	—
ZnTe	0,9	—	—	—
Вюрцит				
CdS	0,065	0,027	0,015	0,025
CdSe	0,42	0,041	0,078	0,433
ZnO	—	—	0,007*	0,052*
ZnS	0,092	0,055	0,029	0,117

* По данным [108] $\Delta_{SO} = 0,38$ эВ.

** По данным [159].

Электрофизические свойства ряда соединений рассматриваемого типа представлены на рис. 21.43—21.56.

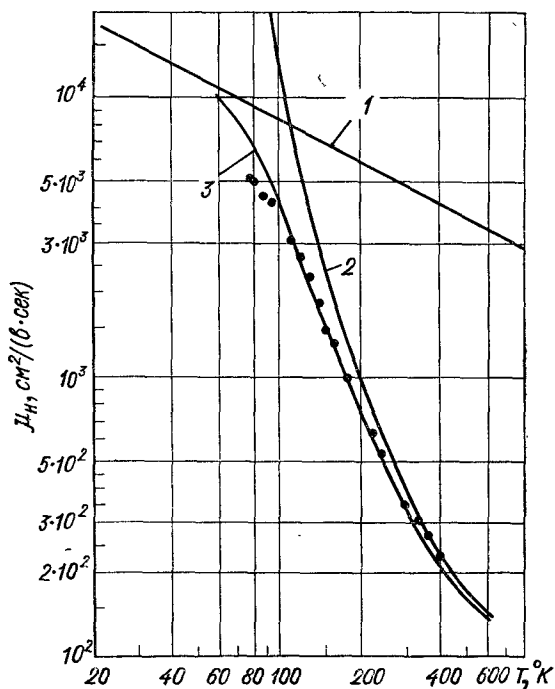


Рис. 21.43. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов в нелегированном n -CdS от температуры [138]:

● — эксперимент; сплошные линии — теоретические зависимости холловской подвижности μ_H в собственном образце для случаев пьезоэлектрического рассеяния (1), рассеяния на оптических фононах (2) и совместного действия обоих механизмов рассеяния (3).

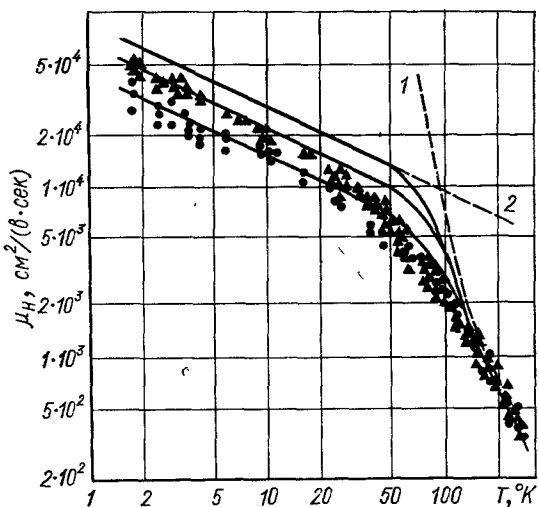


Рис. 21.44. Зависимость холловской подвижности μ_H фотовозбужденных электронов в CdS от температуры [138]:

▲ — ток $\perp$ к оси c ; ● — ток $\parallel$ оси c ; сплошные линии — теоретические кривые, рассчитанные для случая совместного действия рассеяния на оптических фононах (1) и пьезоэлектрического рассеяния (2).

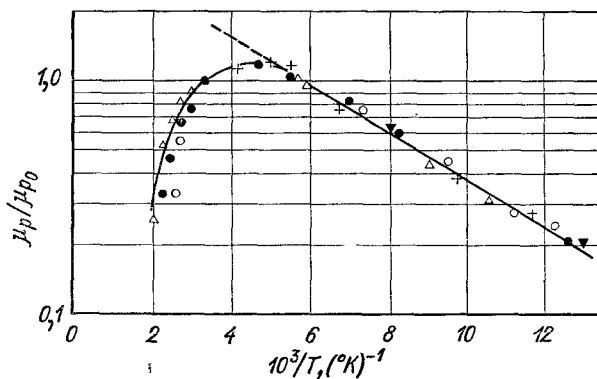


Рис. 21.45. Зависимость дрейфовой подвижности μ_p дырок в CdS, отнесенной к подвижности дырок μ_{p0} при температуре 20° С, от температуры [138]. Точки — данные различных авторов.

Рис. 21.46. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов в n -CdSe от температуры [138]:

эффективная концентрация доноров (Ga), см^{-3} : $+$ — $1 \cdot 10^{16}$ (нелегированный образец); $\blacksquare$ — $1,4 \cdot 10^{17}$; $\blacktriangle$ — $2,4 \cdot 10^{17}$; $\bullet$ — $2,9 \cdot 10^{18}$; сплошные кривые — теоретические зависимости для случаев пьезоэлектрического рассеяния (1), рассеяния на оптических фононах (2) и совместного действия обоих механизмов рассеяния (3).

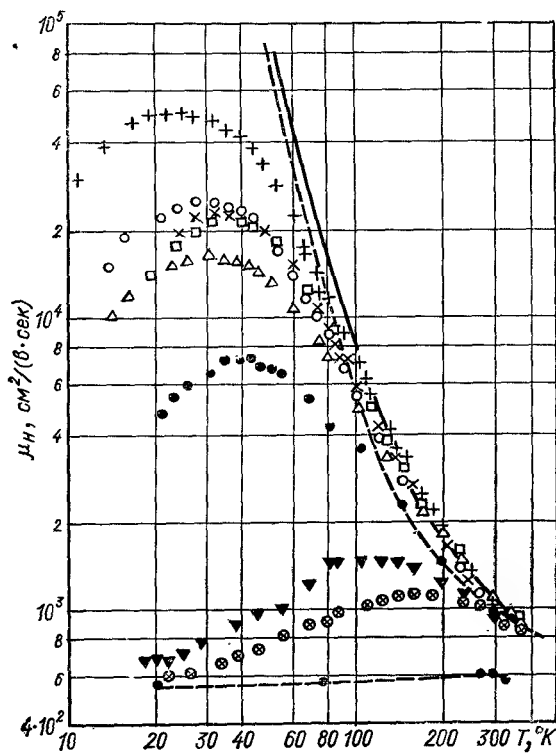
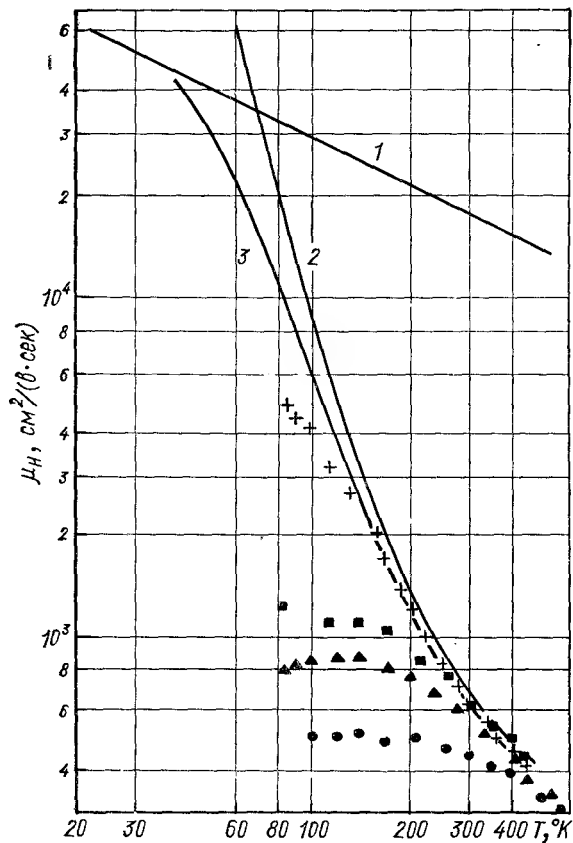


Рис. 21.47. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов в n -CdTe от температуры [138]:

$+$, $\circ$, $\times$, $\square$, $\triangle$ — нелегированные образцы, прошедшие зонную очистку; $\circ$ — образец, отожженный в избытке кадмия после зонной очистки; ∇ , $\oplus$, $\bullet$ — образцы, легированные Nd, In и I соответственно; сплошная кривая — теоретическая зависимость для случая рассеяния на оптических колебаниях с учетом температурной зависимости статической диэлектрической проницаемости; пунктир — без учета этой зависимости.

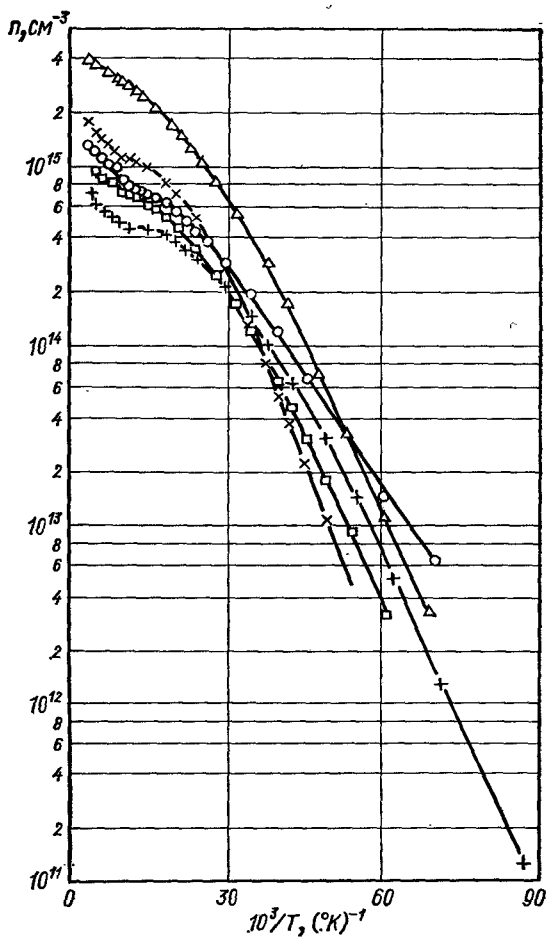


Рис. 21.48. Зависимость концентрации электронов в n -CdTe от температуры [138]. Обозначения см. рис. 21.47.

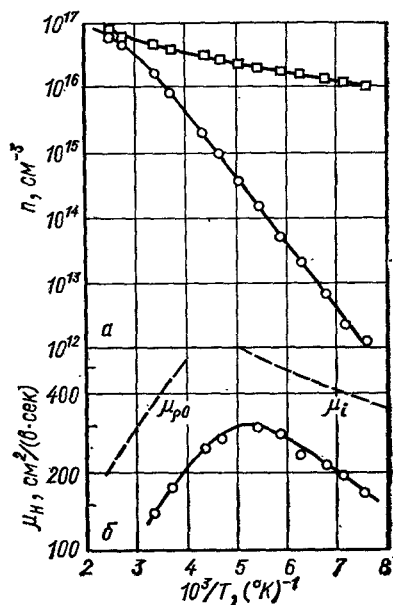


Рис. 21.50. Зависимость концентрации электронов (а) и холловской подвижности μ_H электронов (б) в ZnS от температуры [138]:

○ — гексагональный ZnS, легированный Al и отожженный при 1050°K; □ — кубический ZnS, легированный I и отожженный при 950°K. Штриховая линия (μ_{p0}) — теоретическая зависимость для случая рассеяния на поляризованных оптических колебаниях, пунктир (μ_i) — теоретическая зависимость для случая рассеяния на заряженных примесях.

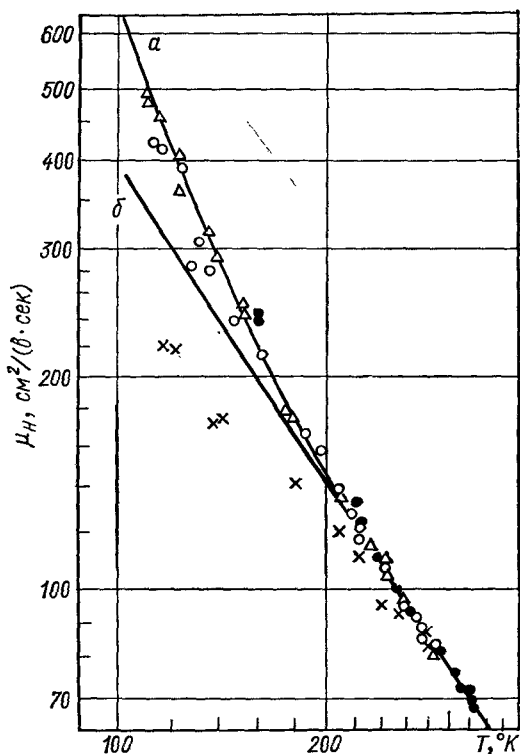


Рис. 21.49. Зависимость холловской подвижности дырок в p -CdTe от температуры [138].

Кривые а и б рассчитаны соответственно по формулам $\mu_H = 57 [\exp(252/T) - 1]$, $\mu_H = 4 \cdot 10^5 \cdot T^{-3/2}$; удельное сопротивление образцов при $T = 293^\circ\text{K}$, ом·см: ● — $2,2 \cdot 10^2$; ○ — $1,5 \cdot 10^2$; × — $1,9 \cdot 10^2$; △ — $2,1 \cdot 10^2$.

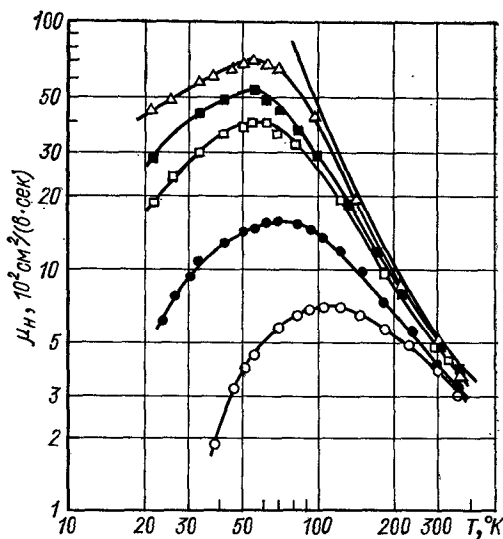


Рис. 21.51. Зависимость холловской подвижности для n -ZnSe от температуры [138] при различной концентрации доноров N_D и акцепторов N_A , 10^{16} см^{-3} :

Δ — $N_D = 0,34$, $N_A = 0,13$; $\blacksquare$ — $N_D = 1,8$, $N_A = 0,5$;
 $\square$ — $N_D = 1,05$; $N_A = 0,75$; $\bullet$ — $N_D = 3,7$,
 $N_A = 0,5$; $\circ$ — $N_D = 7,4$, $N_A = 3,4$.

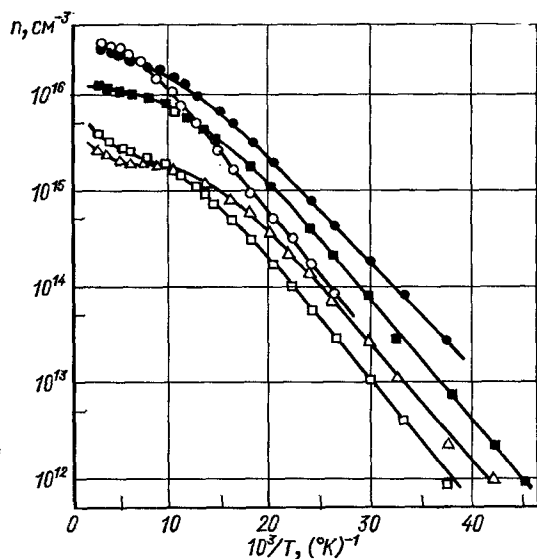


Рис. 21.52. Зависимость концентрации n электронов в n -ZnSe от температуры [138]. Обозначения см. рис. 21.51.

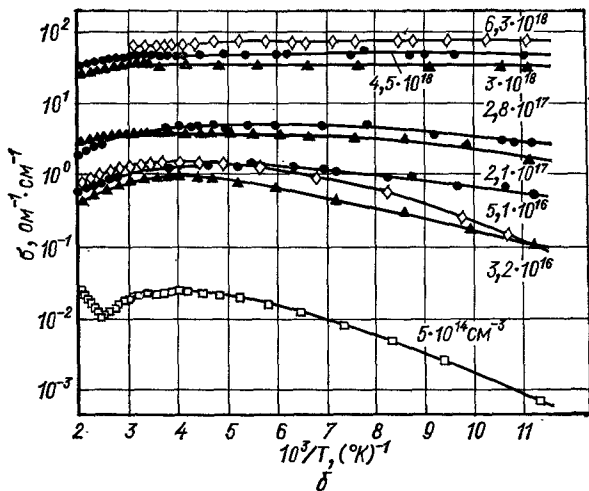
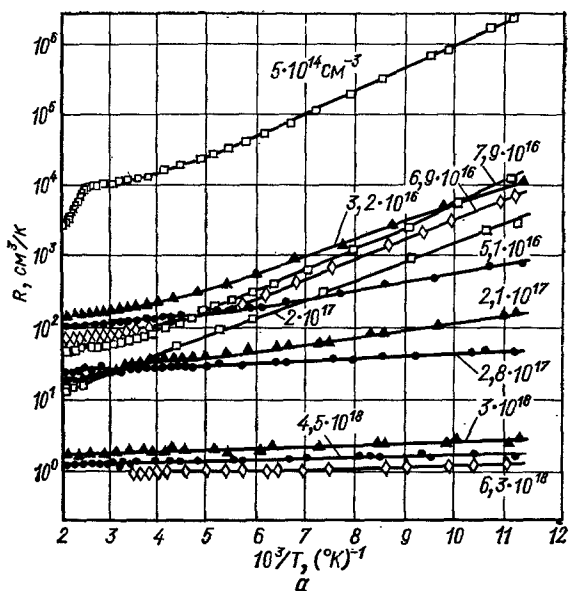


Рис. 21.53. Зависимость постоянной Холла (а) и удельной проводимости (б) для p -ZnTe от температуры [235]. Легирующая примесь: $\diamond$ — Cs; $\square$ — Te; $\blacktriangle$ — P; $\bullet$ — Li; числа у кривых — концентрация носителей при $T = 300 \text{ }^\circ\text{K}$, см^{-3} .

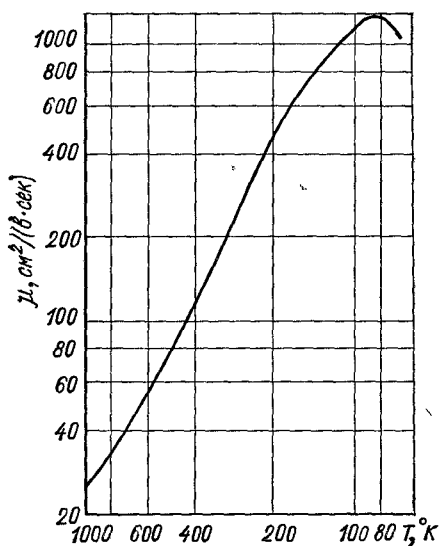
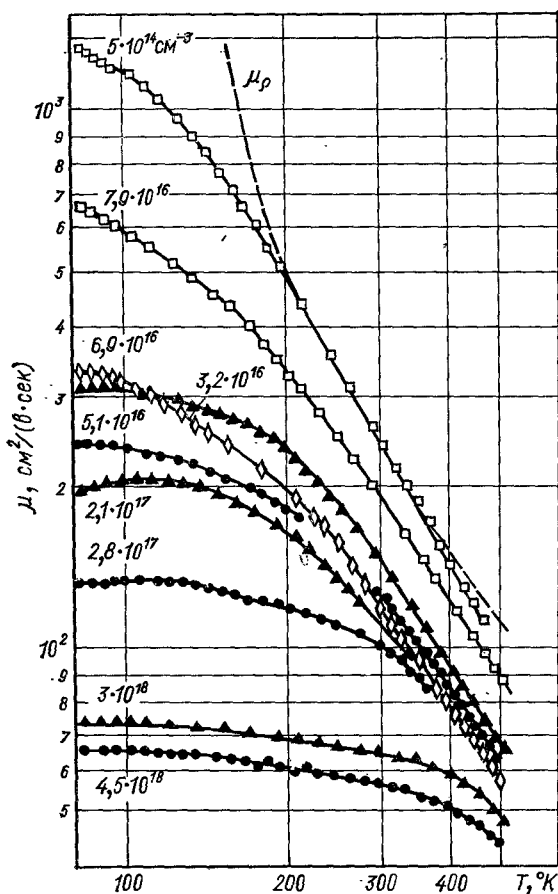


Рис. 21.55. Зависимость подвижности μ для ZnO от температуры [10].

Рис. 21.54. Зависимость подвижности μ в $p\text{-ZnTe}$ от температуры [235].

Обозначения см. в подписи к рис. 21.53; пунктирная кривая — теоретическая зависимость.

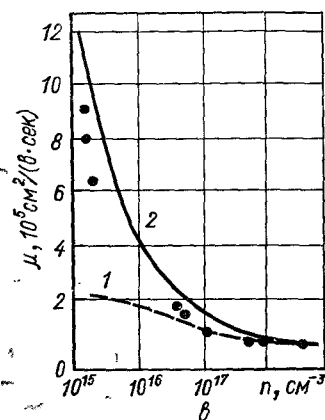
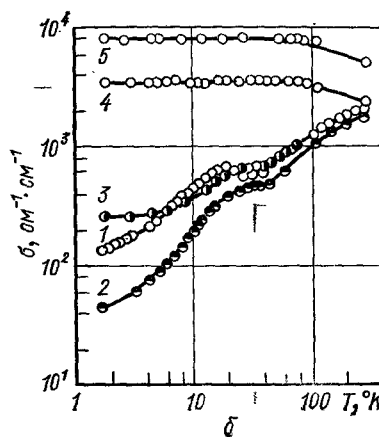
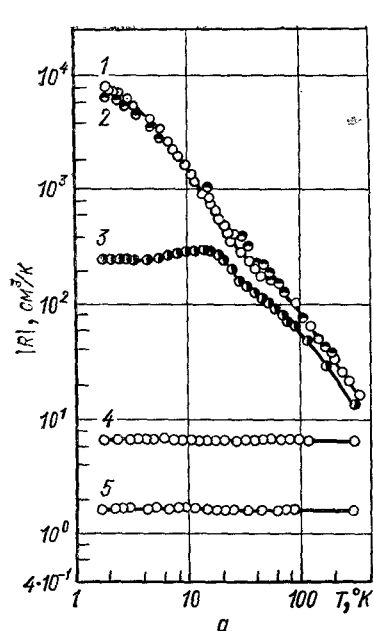


Рис. 21.56. Зависимость постоянной Холла (а) и удельной проводимости (б) в HgTe от температуры [239] и зависимость подвижности электронов от их концентрации при температуре $4,2^\circ\text{K}$ (в) [240].

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Литература	$T_{пл}, ^\circ\text{K}$	Литература	$E_g, \text{эВ}$	Литература	$\frac{dE_g}{dT}, 10^{-4} \frac{\text{эВ}}{\text{град}}$	Литература	$\frac{dE_g}{dP}, 10^{-6} \frac{\text{эВ}}{\text{бар}}$	Литература	Тип проводимости	Литература
	тип	$a, b, c, \text{\AA}$													
ZnO	Гексагональная C_{6v}^4	Тип вюрцита $a = 3,21$ $c = 5,19$	[1] [1]	5,664 5,60	[123] [121]	2248	[123]	3,43 3,35	[66] [144]	—8	[144]	0,6—1,9	[10]	n	[16]
ZnS	Кубическая T_d^2	Тип сфалерита* $a = 5,41$	[138]	4,10	[140]	1923	[123]	3,54 ^{2*} 3,6 3,67(w) 3,91(w)	[123] [114] [138] [123] [138]	—5,3 —3,8(w) ^{2*}	[114] [114]	5,7 9(w) ^{2*}	[114] [114]	n	[16]
ZnSe	Кубическая T_d^2	Тип сфалерита $a = 5,668$	[138]	5,42 5,26	[121] [130]	1788	[123]	2,78 2,7 2,82	[138, 142] [114] [138]	—7,2 (30 < T < 400°K)	[138]	6	[114]	n, p	[138]
ZnTe	Кубическая T_d^2	Тип сфалерита $a = 6,104$	[138]	5,68	[141]	1512	[123]	2,34 2,26 2,2 2,1	[142] [138] [114] [47]	—	—	6	[114]	p	[138]
CdO	Кубическая O_h^5	$a = 4,70$	[1]	8,15	[216]	1700	[123]	2,3 2,68 2,4	[123] [59] [143]	—6	[59]	—	—	n	[60]
CdS	Гексагональная C_{6v}^3	Тип вюрцита ^{3*} $a = 4,136$ $c = 6,713$	[138] [138]	4,82	[139]	2023	[123]	2,52(w) ^{2*} 2,4 (s) 2,58(w)	[142] [214] [138]	—4,4 (77 < T < 300°K)	[138]	3,3 0,4	[114] [123]	n	[138]
CdSe	Гексагональная C_{6v}^4	Тип вюрцита ^{3*} $a = 4,30$ $c = 7,01$	[138] [138]	5,81	[139]	1531	[123]	1,77 1,67 1,8	[142] [138] [114]	—4,6 (90 < T < 400°K)	[144]	—	—	n	[138]
CdTe	Кубическая T_d^2	Тип сфалерита $a = 6,48$	[138]	6,20 5,86	[121] [139]	1371	[123]	1,529 1,5 (300°K) 1,6(77°K) 1,605 (4,2°K)	[68] [236] [236] [236]	—3,0 —5,6	[68] [236]	3,0 8,0	[218] [289]	n, p	[138]

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Литература	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{K}$	Литература	$E_g, \text{эВ}$	Литература	$\frac{dE_g}{dT}, 10^{-4} \frac{\text{эВ}}{^\circ\text{K}}$	Литература	$\frac{dE_g}{dP}, 10^{-8} \frac{\text{эВ}}{\text{бар}}$	Литература	Тип проводимости	Литература
	тип	$a, b, c, \text{\AA}$													
HgS	Кубическая T_d^2	$a=5,851^{4*}$	[138]	7,73	[121]	1750	[242]	2,0	[20, 114]	—	—	—	—	n	[114]
HgSe	Кубическая T_d^2	$a=6,084$	[138]	7,1—8,2 8,26	[121] [139]	1071	[123]	0,2 0,22	[148] [156]	—	—	—	—	n	[138]
HgTe	Кубическая T_d^2	$a=6,460$	[138]	8,17 8,42 8,12	[121] [139] [138]	943	[123]	0,115 (300 °K) 0,250 (77 °K) 0,302 (4,2 °K) 0,3	[33] [33] [38] [199]	+5	[253]	10	[84]	n, p	[114]

* Может кристаллизоваться в структуре типа вюрцита.

** Знаком S отмечены данные, относящиеся к модификации типа сфалерита. ω — типа вюрцита; непомеченные данные относятся к основной модификации.

*** Также может кристаллизоваться в структуре типа сфалерита.

**** Может кристаллизоваться в структуре типа сернистой ртути α -HgS: здесь описывается β -HgS.

Продолжение табл. 21.12

Соединение	m_n/m_0	Литература	m_p/m_0	Литература	$\nu_n, \frac{\text{см}^2}{\text{в-сек}}$	Литература	$\nu_p, \frac{\text{см}^2}{\text{в-сек}}$	Литература	ϵ_n	Литература	ϵ_p	Литература
ZnO	0,27	[123]	—	—	180	[123]	—	—	—1,94	[155]	—1,24—1,74	[155]
ZnS	0,23 0,25 0,27— —0,28(ω)* $m_d=0,1 m_0$	[142] [114] [138] [15]	$m_{\parallel\sigma} > m_0(\omega)^*$ $m_{\perp\sigma}=0,58 m_0(\omega)$ $m_d=0,6 m_0$ 0,5—1	[138] [138] [15] [114]	140 200	[138] [16]	5(700°K)	[138]	1,82 $2,0_{\parallel\epsilon(\omega)}$ $2,3_{\perp\epsilon(\omega)^*}$	[138] [138] [138]	1,04	[148]
ZnSe	0,18 0,17 0,15—0,17	[142] [138] [114]	0,6	[138]	530 260(300—550°K) 6000(55°K)	[138] [114] [153]	23 15(200—400°K)	[154] [114]	1,46	[148]	5,25	[148]
ZnTe	0,2 0,151	[114] [142]	0,1542* $m_d=0,6 m_0$ $m_d=0,65 m_0$	[229] [138] [181]	340 350($\sim T^{-3/2}$)	[138] [114]	110 100($\sim T^{-3/2}$)	[138] [16]	0,4	[148]	10,7	[148]

Соединение	m_n/m_0	Литература	m_p/m_0	Литература	$\mu_n, \frac{\text{см}^2}{\text{в.сек}}$	Литература	$\mu_p, \frac{\text{см}^2}{\text{в.сек}}$	Литература	g_n	Литература	g_p	Литература
CdO	0,1; 0,3 0,2	[143] [17]	—	—	120	[86]	—	—	1,81	[201]	—	—
CdS	0,205 0,1—0,3(s)* $m_d=0,165m_0$	[138] [114] [57]	$m_{\parallel\sigma}=5,0 m_0$ $m_{\perp\sigma}=0,7 m_0$ $m_d=1,34 m_0$ $m_d=(0,4—0,5) m_0$	[138] [138] [21] [114]	350 $6,4 \cdot 10^4 T^{-3/2}$ (50—200°K) $20(\sim T^{-3/2})(s)^*$	[138] [138] [114]	15 50	[138] [46]	$1,78_{\parallel c}$ $1,72_{\perp c}$	[138] [138]	$1,15_{\parallel c}$ 1,00	[138] [148]
CdSe	0,131 0,13	[142] [138, 114]	$m_{1\parallel\sigma} > m_0$ $m_{1\perp\sigma}=0,45m_0$ $m_{1d}=0,63 m_0$ $m_{2\perp\sigma}=0,9 m_0$	[138] [138] [22] [138]	650 580	[138] [114]	50	[114]	$+0,6_{\parallel c}$ $+0,51_{\perp c}$	[138] [138]	—	—
CdTe	0,093 0,111 0,14 0,11	[138] [142] [114] [15]	0,35 $m_{p1}=0,16 m_0$ $m_{p2}=1,02 m_0$	[15, 138] [236] [236]	1050 1200 3000(77°K) $5,7 \cdot 10^4(30^\circ\text{K})$	[138] [121] [121] [149]	$80(\sim T^{-3/2})$ 50	[114] [121]	—1,1	[202]	$-2_{\parallel c}$	[138]
HgS	—	—	—	—	20—50 60 250	[114] [92] [121]	—	—	—	—	—	—
HgSe	$m_{\parallel 1001} =$ $=0,0487m_0$ $m_{\parallel 1111} =$ $=0,0502m_0$ $m_{\parallel 110} =$ $=0,0498m_0$	[156] [156] [156]	0,55 0,17(77—300°K)	[112] [84]	$18\,500(\sim T^{-3/2})$ $10^5(4,2^\circ\text{K})$	[114] [156]	—	—	—36	[157]	—	—
HgTe	0,017 (300°K) 0,03(4,2°K)	[84, 114] [84]	0,16(300°K) 0,35(4,2°K)	[84] [84]	900 000(4,2°K) 100 000(77°K) 30 000(300°K)	[239] [239] [239]	100 $\mu_p = \mu_n/65$ ($T = 77^\circ\text{K}$)	[121] [145]	—25 —29 —40	[157] [236] [158]	—	—

* s — данные, относящиеся к модификации типа сфалерита, ω — вюрцита; непомеченные данные относятся к основной модификации.

** Масса легких дырок.

Соединение	$\chi, \frac{\text{вт}}{\text{см} \cdot \text{град}}$	Литература	$T_D, ^\circ\text{K}$	Литература	$\hbar\omega_L, \text{эВ}$	Литература	$\hbar\omega_P, \text{эВ}$	Литература
ZnO	—	—	416	[141]	0,0605 0,0732	[220] [254]	0,0545 0,0512	[220] [254]
ZnS	0,026	[138]	315(80°K) 310	[114] [140]	0,044	[138]	0,0394(ω)* 0,0367	[138] [138]
ZnSe	0,19	[138]	400(80°K)	[114]	0,031	[138]	0,0263	[138]
ZnTe	0,18	[138]	250(80°K)	[114]	0,026	[138] [254]	0,024 0,0219	[138] [254]
CdO	—	—	—	—	0,0654	[254]	0,0325	[254]
CdS	0,2	[138]	250—300	[114]	0,038	[138] [254]	0,0324 0,0301	[138] [254]
CdSe	0,043	[138]	230(80°K)	[114]	0,027 0,0263	[138] [254]	0,0263 0,0172	[142] [254]
CdTe	0,075	[138]	200(80°K) 158	[114] [236]	0,0212	[138, 254]	0,0173	[138, 254]
HgS	—	—	—	—	—	—	—	—
HgSe	0,019	[138]	212(80°K) 242(300°K)	[114] [114]	—	—	—	—
HgTe	0,019 0,016 0,027(ρ -тип)	[236] [138] [199]	141	[250]	~0,014 0,0171	[160] [252]	0,0146	[252]

* s — данные, относящиеся к модификации типа сфалерита, ω — вюрцита; непомеченные данные относятся к основной модификации.

Соединение	$\langle \epsilon_0 \rangle^*$	Литература	$\langle \epsilon_\infty \rangle^*$	Литература	ϵ_{011}	Литература	ϵ_{033}	Литература	$\epsilon_{\infty 11}$	Литература	$\epsilon_{\infty 33}$	Литература
ZnO	8,5	[159]	4,0	[159]	7,55	[254]	8,63	[254]	3,69	[254]	3,69	[254]
ZnS	8,32	[138]	5,13	[138]	8,32	[138]	—	—	5,13	[138]	—	—

Соединение	$\langle \epsilon_0 \rangle^*$	Литература	$\langle \epsilon_\infty \rangle^*$	Литература	ϵ_{011}	Литература	ϵ_{033}	Литература	$\epsilon_{\infty 11}$	Литература	$\epsilon_{\infty 33}$	Литература
ZnSe	9,1 8,81 8,33	[138] [254] [142]	5,75 5,9 5,9	[114] [138] [254]	9,12	[138]	—	—	5,9	[138]	—	—
ZnTe	10,1 9,67	[138] [142]	7,28 8,26	[138] [114]	10,1	[138]	—	—	7,28	[138]	—	—
CdO	21,9	[254]	5,4	[254]	—	—	—	—	—	—	—	—
CdS	9,3	[138]	5,2	[138]	9,02	[138]	9,53	[138]	5,17	[138]	5,23	[138]
CdSe	9,4 9,63	[138] [138]	5,98 6,10	[138] [142]	10,2	[138]	9,33	[138]	5,96	[138]	6,05	[138]
CdTe	10,6 9,65 10,6 11,0	[138] [142] [252] [161]	7,6 7,21 7,4 7,1	[114] [138] [252] [161]	10,6	[138]	—	—	7,21	[138]	—	—
HgS	30,7	[114]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
HgSe	25,6 26 (10^4 — 10^6 эд)	[114] [138]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
HgTe	48 21,0 20,1	[114] [252] [254]	14 14 15,2	[138] [254] [252]	—	—	—	—	—	—	—	—

* Значение, усредненное по кристаллографическим направлениям.

Свойства примесей в соединениях A^{II}B^{VI}

Соединение	$E_D^*, \text{эВ}$	Литература	$E_A^{2*}, \text{эВ}$	Литература	$E_A^{3*}, \text{эВ}$	Литература
ZnO	0,05 (доноры Zn, H)	[116]	—	—	—	—
ZnS	0,2—0,3	[138]	0,19 1,2 (Cu)	[138] [138]	—	—
ZnSe	0,19—0,23	[138]	0,11; 0,75 (Cu) 0,66 (Li)	[138] [154]	E_g —0,16	[138]
ZnTe	—	—	0,048 (V_{Zn}^-); 0,14 (V_{Zn}^{2-}); 0,15 (Cu); 0,11 (Ag); 0,22 (Au)	[138]	—	—
CdS	0,024—0,032 0,45; 0,63; 0,25**	[138] [138]	0,17	[138]	E_g —0,09	[138]
CdSe	0,014—0,03	[138]	0,1	[138]	—	—
CdTe	0,011—0,022	[138]	0,05 (V_{Cd}^-); 0,33—0,35 (Cu); 0,3—0,33 (Ag); 0,33— —0,4 (Au)	[138]	E_g —0,056 E_g —0,6 (V_{Cd}^{2-})	[138]
HgSe	Доноры: Hg в междоузлиях, вакансии Se, Ge, Si	[114] [138]	—	—	—	—
HgTe	Доноры In, Ga, Al	[251]	Акцепторы: Cu, вакансии Hg, Ag, Au	[138] [114] [251]	—	—

* Энергия ионизации мелких донорных уровней, хорошо описывающихся «водородоподобной моделью». Донорами могут являться Al, Cu, In, Cl, Br, I, F, но основной вид доноров — врожденный дефект: междоузельный Cd или Zn.

** Энергия ионизации мелких акцепторов; обычно это V_{Zn}^- (вакансия однократно заряженная), $V_{\text{Cd}}^-, V_{\text{Zn}}^{2-}, V_{\text{Cd}}^{2-}$, Cu, Ag, Au.

*** Энергия ионизации акцепторных уровней вблизи зоны проводимости. Там, где не отмечено специально, — комплекс: дефект — примесь.

**** Неопознанные уровни.

Таблица 21.14

Полупроводниковые соединения типа A^{II}B^{VII}

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	$E_g, \text{эВ}$	Литература	$\frac{m_n}{m_0}$	Литература	$\frac{1}{\nu_n}, \frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$	Литература
	Тип	$a, b, c, \text{\AA}$							
CdF ₂	Кубическая O_h^5	$a=5,39$	[1]	6,05	[26]	0,4	[26]	19	[26]
HgI ₂	Орторомбическая C_{2v}^{12}	$a=4,67$ $b=13,76$ $c=7,32$	[1]	1,92—2,24 (черная) 2,11 (красная) 2,13	[242] [242] [10]	—	—	—	—

Соединения типа $A^{III}B^{IV}-A^{III}B^{VI}$

Соединения $A^{III}B^{IV}$. Соединение B_4C (плотность $\rho = 2,5 \div 2,6 \text{ г/см}^3$ [216]) проявляет полупроводниковые свойства. Ширина запрещенной зоны $E_g = 1,64 \text{ эВ}$, проводимость p -типа, $\alpha = 300 \text{ мкВ/град}$. При $T = 2623^\circ \text{ К}$ разлагается на элементы [16]. Кристаллическая структура — гексагональная, тип D_{3d}^5 , $a = 5,60 \text{ \AA}$, $c = 12, 12 \text{ \AA}$ [242].

Соединения $A^{III}B^{VI}$. Для соединений типа $A^{III}B^{VI}$ характерны высокая подвижность и малая эффективная масса электронов. Эти свойства обеспечивают им широкое применение. Изучены весьма подробно.

Кристаллизуются в структуру типа сфалерита (T_d^2). Зоны проводимости имеют, как правило, несколько минимумов, расположенных в точке $k = 0$ и на осях $[111]$ и $[100]$.

Абсолютный минимум Γ расположен в центре зоны Бриллюэна ($k = 0$) в InSb , InAs , InP , GaSb , GaAs (рис. 21.57); абсолютный минимум Δ — на оси $[100]$ в GaP , AlSb , AlAs (рис. 21.58). Значения параметров зонной структуры — в табл. 21.15.

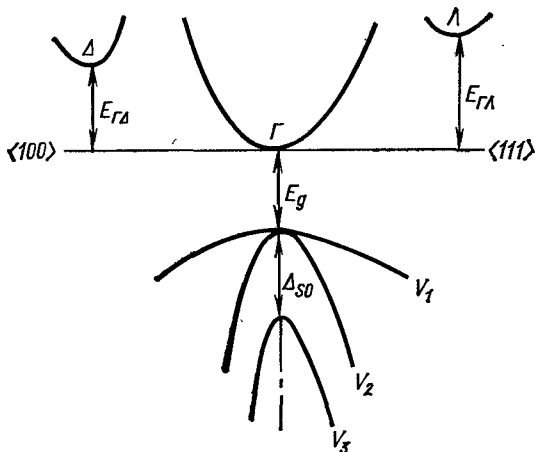


Рис. 21.57. Зонная структура InSb , InAs , InP , GaSb , GaAs [121, 170, 171].

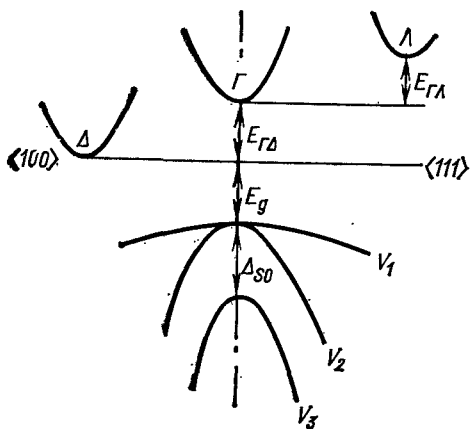


Рис. 21.58. Зонная структура GaP , AlSb , AlAs [121, 170—172].

Валентная зона вырождена при $k = 0$. Максимум зоны легких дырок V_2 находится в точке $k = 0$; максимумы зоны тяжелых дырок V_1 расположены несколько выше (на $0,01-0,001 \text{ эВ}$) и лежат на осях $[111]$. Имеется также зона V_3 , отщепленная за счет спин-орбитального взаимодействия Δ_{so} .

Электрофизические свойства соединений рассматриваемого типа см. на рис. 21.59—21.83.

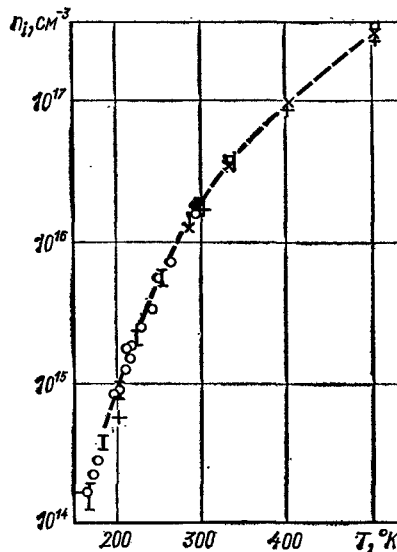


Рис. 21.59. Зависимость собственной концентрации n_i в InSb от температуры [27].

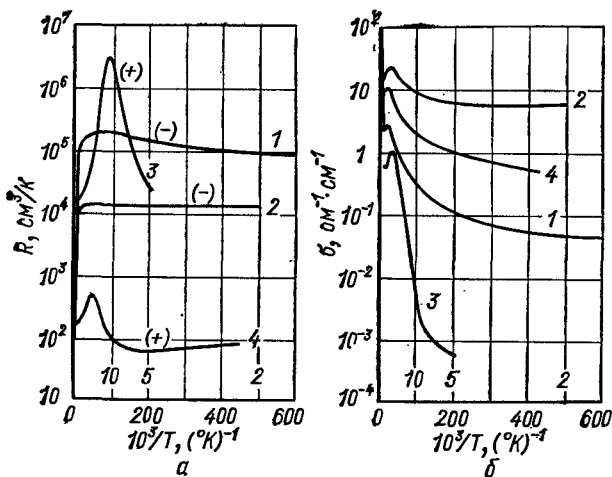


Рис. 21.60. Зависимости коэффициента Холла (а) и удельной проводимости (б) в InSb при низких температурах от температуры [27].

Эффективная концентрация доноров, см^{-3} :

1— $5 \cdot 10^{18}$, 2— $5 \cdot 10^{14}$; эффективная концентрация акцепторов, см^{-3} : 3— $4 \cdot 10^{14}$, 4— $4 \cdot 10^{18}$ [(+) и (—) означают знаки коэффициента Холла].

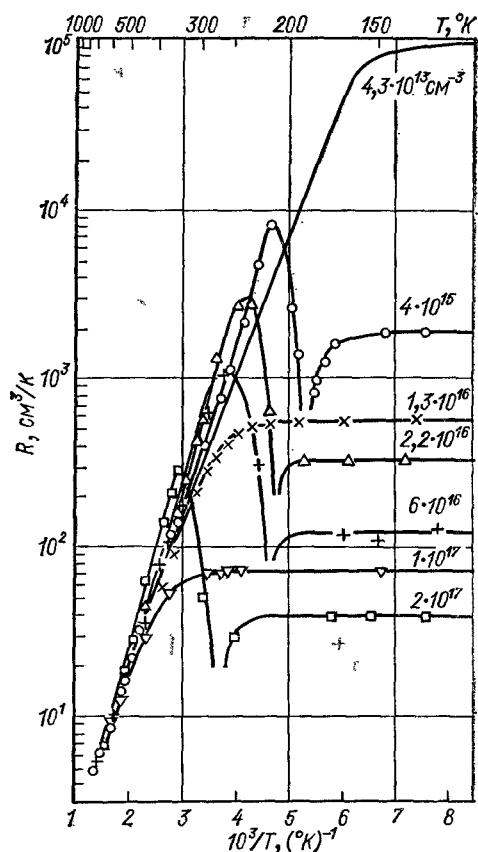


Рис. 21.61. Зависимость постоянной Холла в InSb для образцов n - и p -типа от температуры [170] при различной концентрации примесей; (2, 4, 5, 7 сверху), — акцепторы, 1, 3, 6 — доноры, см^{-3} .

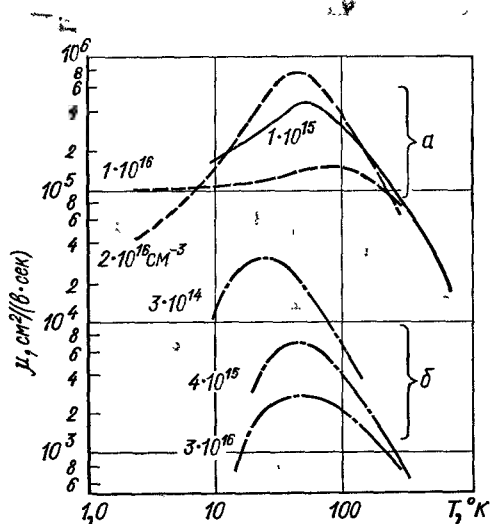


Рис. 21.63. Зависимость подвижности электронов (а) и дырок (б) в InSb от температуры при различной концентрации носителей [27].

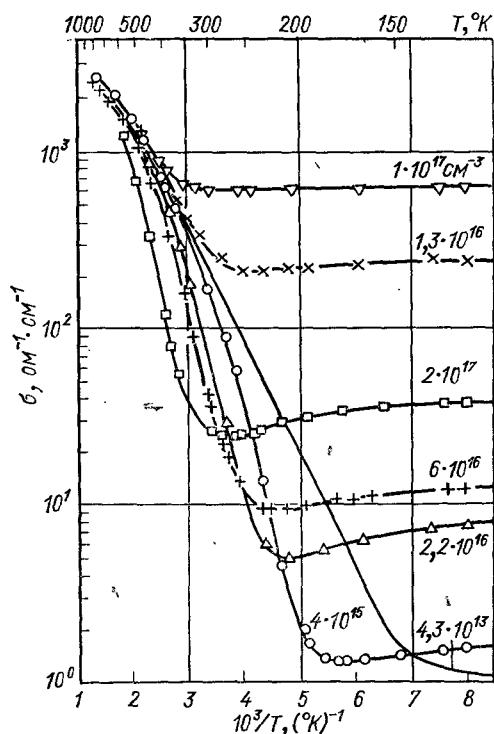


Рис. 21.62. Зависимость удельной проводимости InSb от температуры [170]. Обозначения см. в подписи к рис. 21.61.

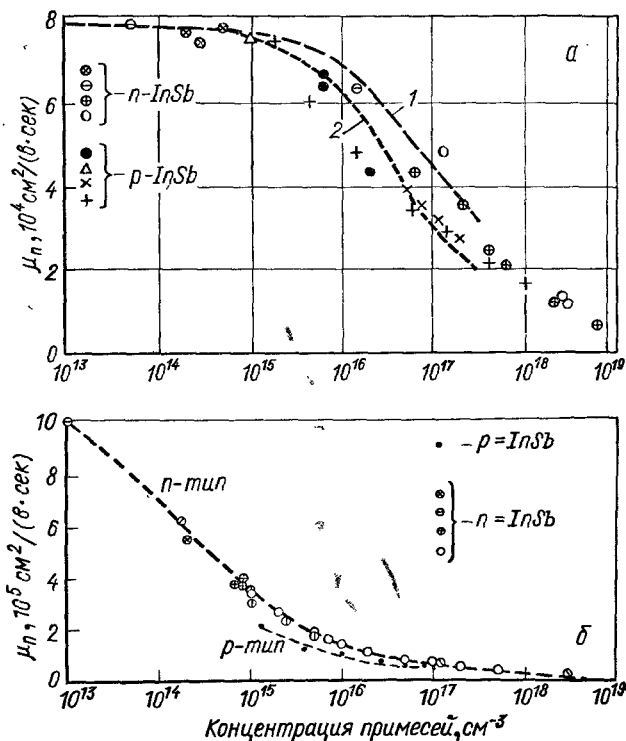


Рис. 21.64 Зависимость подвижности μ_n электронов при $T = 273$ (а) и 77°K (б) от концентрации примесей в InSb n - и p -типа [27].

1 — теория для образцов n -типа; 2 — теория для образцов p -типа.

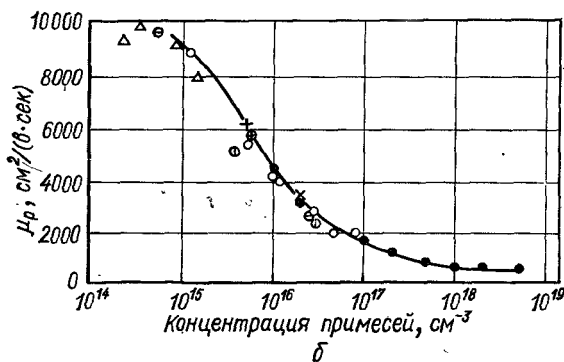
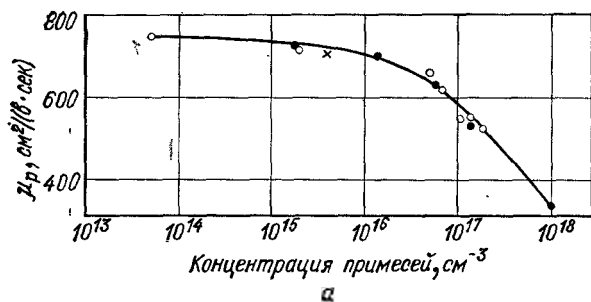


Рис. 21.65. Зависимость подвижности μ_p дырок при $T = 293$ (а) и 77°K (б) от концентрации примесей в InSb [27]. Точки — данные различных авторов.

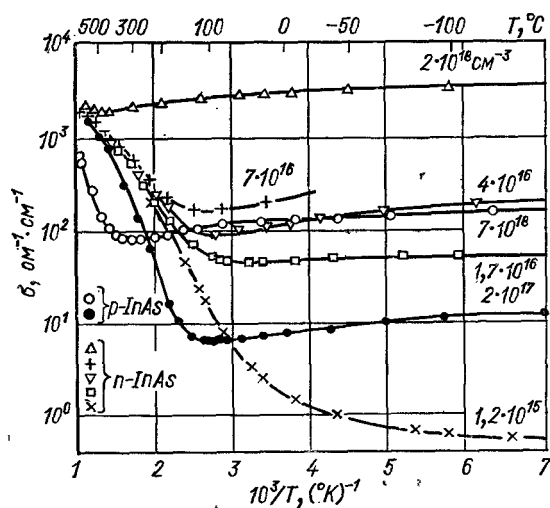


Рис. 21.66. Зависимость удельной проводимости InAs от температуры [170] при различной концентрации акцепторов в $p\text{-InAs}$ и доноров в $n\text{-InAs}$.

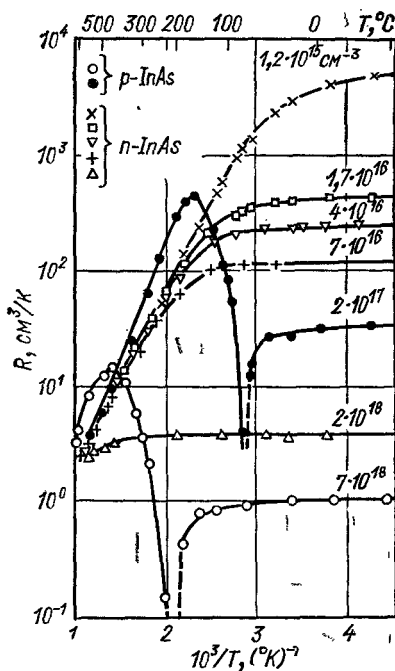


Рис. 21.67. Зависимость постоянной Холла в InAs от температуры [170].

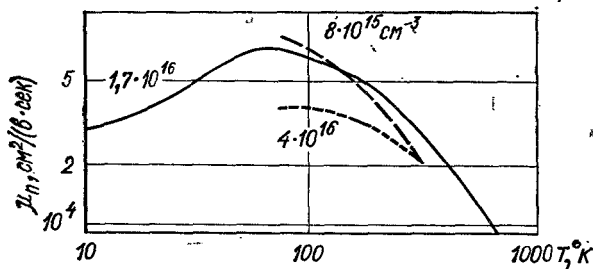


Рис. 21.68. Зависимость подвижности электронов в InAs от температуры [27]. Числа у кривых — концентрация носителей, см^{-3} .



Рис. 21.69. Зависимость подвижности μ_n электронов при $T = 293^\circ\text{K}$ от концентрации примесей в $n\text{-InAs}$ [27].
○ — образцы, прошедшие термообработку;
× — необработанные образцы.

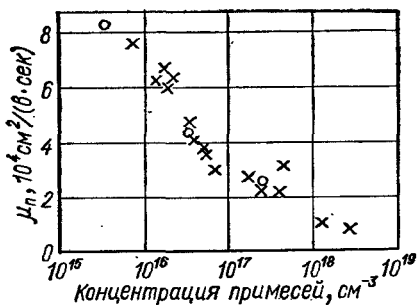


Рис. 21.70. Зависимость подвижности μ_n электронов при $T = 77^\circ\text{K}$ от концентрации примесей в $n\text{-InAs}$ [27]:
 о — образцы, прошедшие термообработку; х — необработанные образцы.

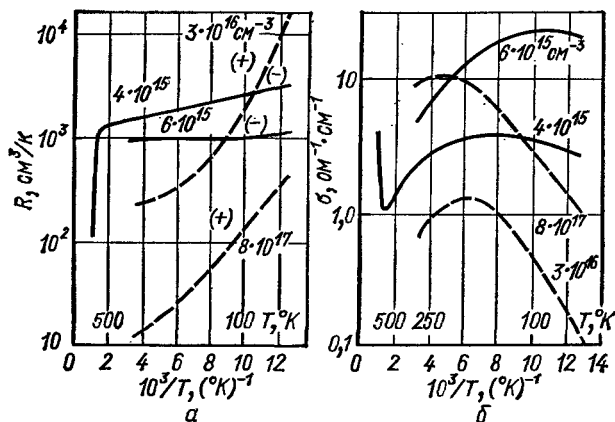


Рис. 21.71. Зависимость постоянной Холла (а) и удельной проводимости (б) в InP от температуры при различной эффективной концентрации доноров (сплошная кривая) и эффективной концентрации акцепторов (пунктир) [27].

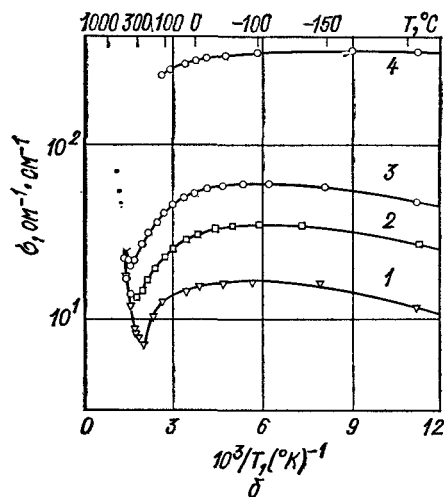
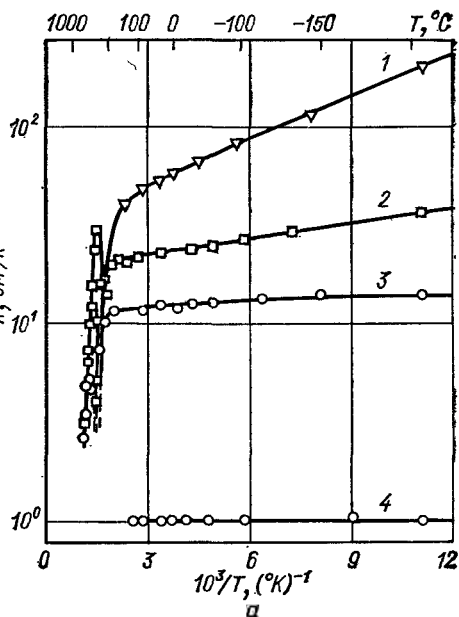
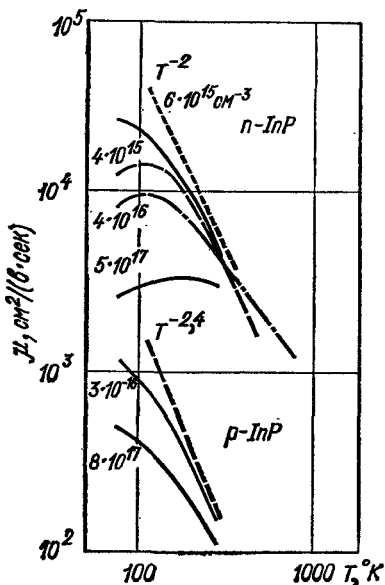


Рис. 21.73. Зависимости постоянной Холла (а) и удельной проводимости (б) в GaSb на одних и тех же образцах от температуры [170].

Рис. 21.72. Зависимость подвижности μ электронов и дырок в InP от температуры при различной эффективной концентрации доноров и эффективной концентрации акцепторов [27].

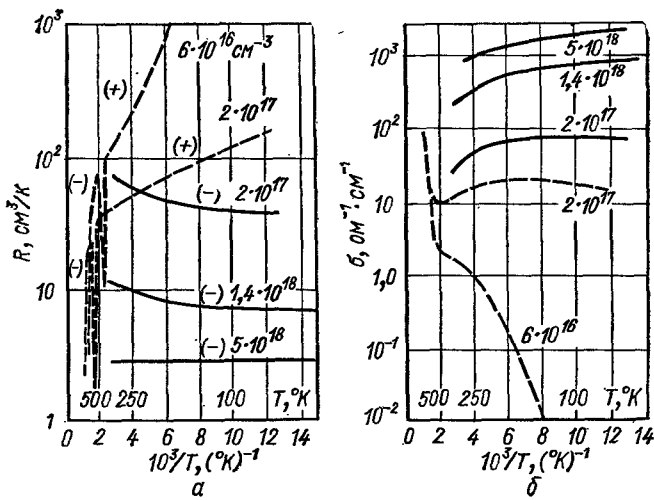


Рис. 21.74. Зависимости постоянной Холла (а) и удельной проводимости (б) в GaSb от температуры при различной эффективной концентрации доноров (сплошная кривая) и эффективной концентрации акцепторов (пунктир) [27].

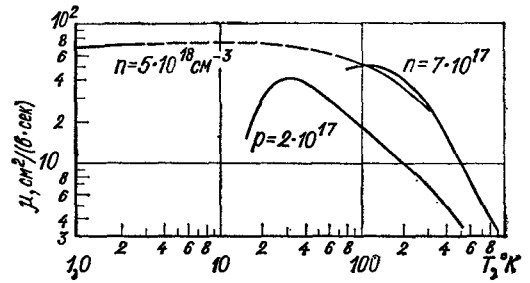


Рис. 21.75. Зависимость подвижности носителей в GaSb от температуры [27].

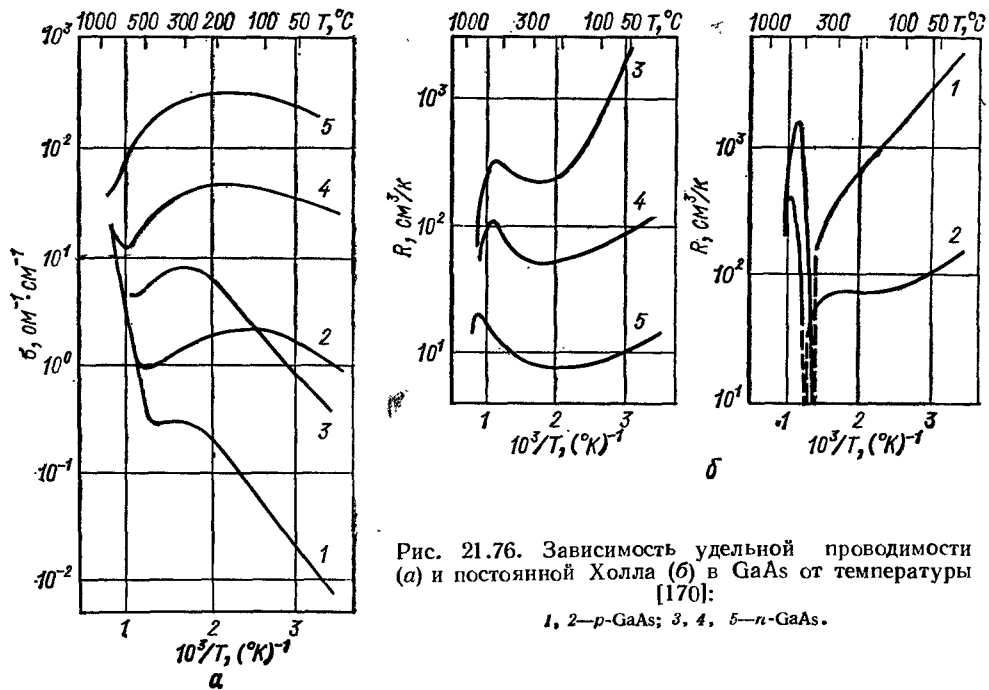


Рис. 21.76. Зависимость удельной проводимости (а) и постоянной Холла (б) в GaAs от температуры [170]:

1, 2—p-GaAs; 3, 4, 5—n-GaAs.

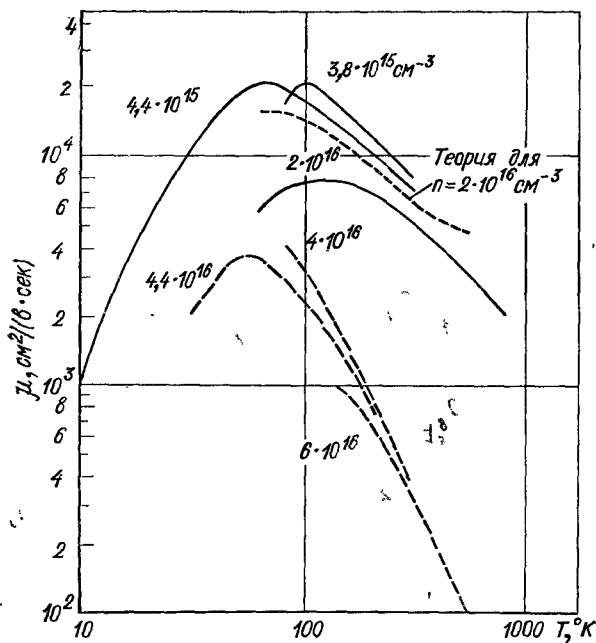


Рис. 21.77. Зависимость подвижности μ электронов (сплошные линии) и дырок (пунктир) в GaAs от температуры [27] при различной эффективной концентрации доноров и эффективной концентрации акцепторов.

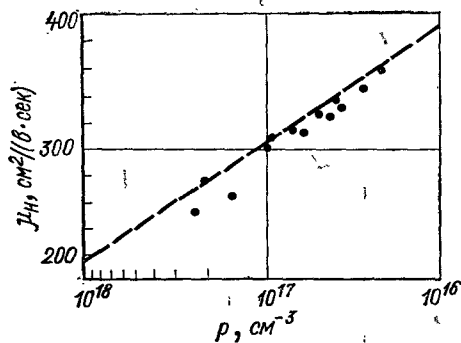


Рис. 21.79. Зависимость холловской подвижности μ_H дырок при $T = 300^\circ \text{K}$ от их концентрации в $p\text{-GaAs}$ [170].

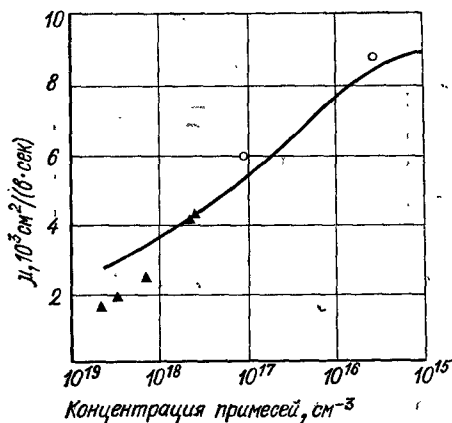


Рис. 21.78. Зависимость подвижности μ электронов при $T = 300^\circ \text{K}$ от концентрации примесей в GaAs.

Сплошная кривая — теоретическая зависимость для комбинированного рассеяния на полярных колебаниях и ионизованных примесях [170];
○, ▲ — эксперимент.

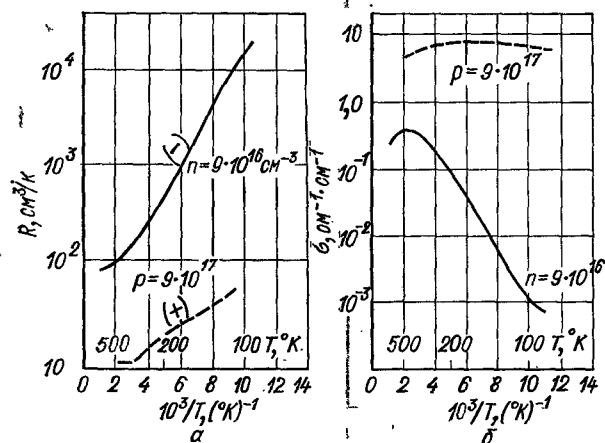


Рис. 21.80. Зависимость постоянной Холла (а) и удельной проводимости (б) в GaP от температуры [27].

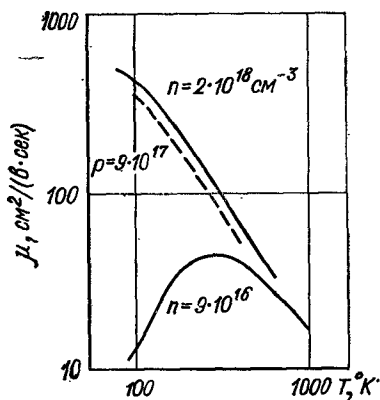


Рис. 21.81. Зависимость подвижности μ электронов и дырок в GaP от температуры [27].

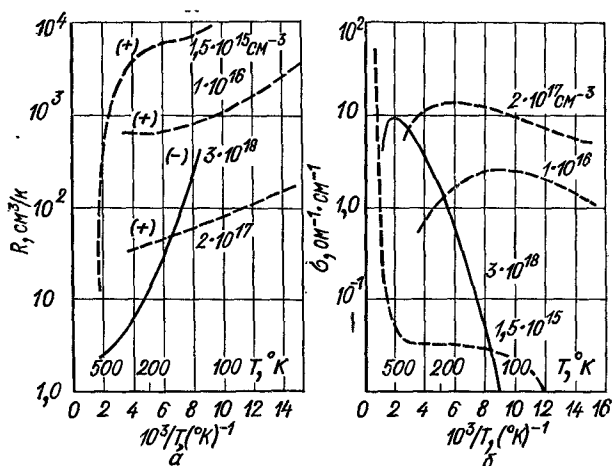


Рис. 21.82. Зависимость постоянной Холла (а) и удельной проводимости (б) в AlSb от температуры при различной эффективной концентрации доноров (образец легирован теллуром) и акцепторов [27].

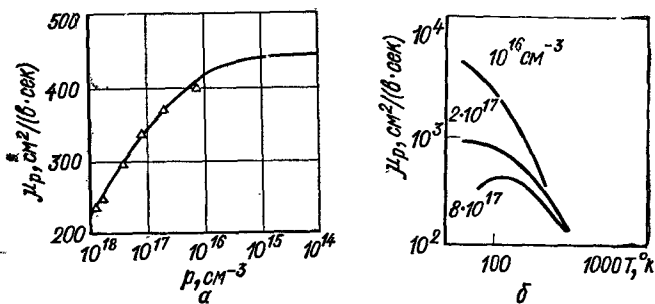


Рис. 21.83. Зависимость подвижности дырок в AlSb при $T = 293^\circ \text{K}$ от их концентрации (а) и от температуры (б) [170].

Сплошная линия — теоретическая зависимость для комбинированного рассеяния на акустических фононах и нонизированных примесях.

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений $A^{III}B^{V2}$

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Литература	$T_{пл}, ^\circ\text{K}$	Литература	$T_D, ^\circ\text{K}$	Литература	$\chi, \frac{\text{вт}}{\text{см} \cdot \text{град}}$	Литература	$\hbar\omega_I, \text{эв}$	$\hbar\omega_T, \text{эв}$	Литература	ε_0	Литература	ε_∞	Литература	$\mu_n, \frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$	Литература	$\mu_p, \frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$	Литература
	Тип	$a, \text{\AA}$																				
BP	Кубическая T_d^2	4,537	[242]	2,89	[242]	2000—3000; 1250	[242]	—	—	—	—	—	—	—	11,6	[242]	—	—	—	—	—	—
AlN	Гексагональная C_{6v}^4	$a=3,104$ $c=4,965$	[242]	3,26	[242]	2470*	[242]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
AlP	Кубическая T_d^2	5,42	[1]	2,85	[123]	1770	[123]	588	[178]	0,92	[216]	0,0621	0,0545	[254]	9,83	[254]	7,56	[254]	50	[28]	150	[28]
AlAs	Кубическая T_d^2	5,62	[1]	3,6	[121]	1870	[123]	417	[121]	0,84	[121]	0,0501	0,0447	[254]	11	[254]	9	[254]	1200	[115]	—	—
AlSb	Кубическая T_d^2	6,10	[1]	4,15	[121]	1327	[123]	292	[121]	0,59	[121]	0,0428 0,0421	0,0394 0,0395	[170] [254]	11,5 11,6	[27] [254]	11,6 10,2	[170] [254]	200	[121]	420 (300°K) 3700 (77° K)	[27] [27]
GaN	Гексагональная C_{6v}^4	$a=3,18$ $c=5,166$	[242] [242]	6,10	[242]	~1500	[242]	—	—	—	—	—	—	—	12,2	[214]	5,8	[214]	380	[214]	—	—
GaP	Кубическая T_d^2	5,44	[1]	4,4	[121]	1623	[123]	446	[121]	0,75	[121]	0,04995 0,0072 0,0455	[170] [254]	10,18 10,7	[170] [254]	8,46 8,5	[170] [254]	300 (300°K) 500 (77° K)	[123] [27]	75 (300°K) 420 (77° K)	[27] [27]	
GaAs	Кубическая T_d^2	5,69	[1]	5,4	[121]	1510	[123]	344	[121]	0,46	[121]	0,0368 0,0362	0,0462 0,0354	[170] [254]	12,53 12,9	[170] [254]	11,6 10,9	[170] [254]	$8,5 \cdot 10^3$ (300°K) $2,1 \cdot 10^4$ (77°K)	[27] [27]	420 (300°K) 4200 (77°K)	[27] [27]

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	$\frac{\rho}{\rho_{\text{св}}}$	Литература	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{K}$	Литература	$T_D, ^\circ\text{K}$	Литература	$\chi, \frac{\text{см}^3}{\text{моль}}$	Литература	$n_{\text{ол}}, \text{эв}$	$n_{\text{ол}}, \text{эв}$	Литература	ε_0	Литература	ε_∞	Литература	$\mu_n \cdot \frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$	Литература	$\mu_p \cdot \frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$	Литература
	Тип	$a, \text{ \AA}$																				
GaSb	Кубическая T_d^2	6,09	[1]	5,65	[121]	985	[123]	265	[121]	0,34	[121]	0,0298	0,0286	[170, 254]	15 16,1	[27] [254]	15,2 14,4	[170] [254]	4000 (300°K) 6000 (77°K)	[27] [27]	1400 (300°K) 3600 (77°K)	[27] [27]
InN	Гексагональная C_{6v}^4	$a=3,53$ $c=5,69$	[242] [242]	6,88	[242]	1200	[242]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
InP	Кубическая T_d^2	5,86	[1]	4,79	[123]	1327	[123]	321	[121]	0,67	[121]	0,0435	0,038	[170, 254]	14 12,4	[27] [254]	10,9 9,6	[170] [254]	$4,6 \cdot 10^3$ (300°K) $2,4 \cdot 10^4$ (77°K)	[27] [27]	150 (300°K) 1200 (77°K)	[27] [27]
InAs	Кубическая T_d^2	6,06	[1]	5,68	[121]	1216	[123]	249	[121]	0,27	[121]	0,030	0,0272	[170, 254]	14,5 14,9	[27] [254]	11,6 12,3	[170] [254]	$3,3 \cdot 10^4$ (300°K) $8,2 \cdot 10^4$ (77°K)	[27] [27]	460 (300°K) 690 (77°K)	[27] [27]
InSb	Кубическая T_d^2	6,48	[1]	5,78	[121]	798	[123]	262	[121]	0,17	[121]	0,0244	0,0228 0,0229	[170] [254]	17 17,7	[27] [254]	16,8 15,6	[170] [254]	$7,8 \cdot 10^4$ (300°K) $1,2 \cdot 10^6$ (77°K)	[27] [27]	750 (300°K) 10^4 (77°K)	[27] [27]

* Давление 4 атм, в азоте.

** Соединения DyN, HoN, ErN имеют кристаллическую структуру типа O_h^5 (кубическая); $a=4,905 \text{\AA}$, $4,874 \text{\AA}$ для первых двух соответственно; E_g в этих соединениях составляет 2,1—2,9; 1,9—2,2; 2,4—2,8 эв соответственно [242]. Для BSb $E_g=2,6 \text{ эв}$ [242].

Соединение	Абсолютный минимум зоны проводимости	Литература	$E_{\text{ГЛ}}, \text{эв}$	Литература	$E_{\text{ГЛ}}, \text{эв}$	Литература	$E_g, \text{эв}$	Литература	$\Delta_{80}, \text{эв}$	Литература	$\frac{m_{(000)}^*}{m_0}$	Литература	$\frac{m_{(111)}^*}{m_0}$	Литература
BP	—	—	—	—	—	—	4,5; 4,2	[242]	—	—	—	—	—	—

Соединение	Абсолютный минимум зоны проводимости	Литература	$E_{ГД}, эв$	Литература	$E_{ГД}, эв$	Литература	$E_g, эв$	Литература	$\Delta_{SO}, эв$	Литература	$\frac{m_n^{(000)}}{m_0}^*$	Литература	$\frac{m_n^{(111)}}{m_0}^*$	Литература
AlN	—	—	—	—	—	—	3,8—5 (оптич.) 4,0 3,8	[242]	—	—	—	—	—	—
AlP	—	—	—	—	—	—	3,0	[173]	0,05	[173]	—	—	—	—
AlAs	(100)	[170]	1,3	[172]	—	—	2,2	[172]	0,29	[173]	—	—	—	—
AlSb	(100)	[170]	0,7 0,29	[171] [170]	—	—	1,9 1,6	[84] [171]	0,75 1,3	[170]	0,09	[123]	—	—
GaN	—	—	—	—	—	—	3,3; 3,25 (300°K)	[242]	—	—	0,19—0,40	[214]	—	—
GaP	(100)	[170]	0,35	[185, 170]	0,25	[185]	2,34 2,3	[171] [84]	0,1	[171]	0,12	[123]	—	—
GaAs	(000)	[170]	0,36	[185]	0,5	[185]	1,52	[171]	0,33	[170]	0,067	[84]	—	—
GaSb	(000)	[170]	0,4	[170]	0,07	[170]	0,813	[170]	0,8 0,749	[171] [84]	0,047	[170]	0,9	[170]
InN	—	—	—	—	—	—	~2,4 (300°K)	[242]	—	—	—	—	—	—
InP	(000)	[170]	0,7	[170]	0,4	[84]	1,416 1,4	[170] [84]	0,1	[171]	0,082 0,073 (300°K)	[174] [84]	—	—
InAs	(000)	[170]	—	—	—	—	0,425 0,43—0,45	[170] [84]	0,43 0,38	[170] [84]	0,023	[170]	—	—
InSb	(000)	[170]	—	—	0,45—0,5	[84]	0,236	[170, 84]	0,98 0,803	[170] [84]	0,014	[170]	—	—

* Индекс в скобках указывает, на какой оси расположен минимум зоны проводимости, к которому относятся приводимые данные.

Соединение	$\frac{m_n^{(100)}}{m_0}$	Литература	$\frac{m_{p1}}{m_0}$	Литература	$\frac{m_{p2}}{m_0}$	Литература	$\frac{m_{dp}}{m_0}$	Литература	g_n	Литература	$\frac{dE_g}{dT}$, 10^{-4} эВ/град	Литература	$\frac{dE_g}{dP}$, 10^{-6} эВ/бар	Литература
BP	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
AlN	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
AlP	—	—	—	—	0,39	[173]	—	—	—	—	—	—	—	—
AlAs	—	—	—	—	0,22	[173]	—	—	—	—	—	—	—	—
AlSb	0,39 $m_{\perp}=0,25$	[170] [84]	0,4	[123]	0,12 0,137	[170] [173]	0,9	[173]	—	—	—3,5(0°K) —4,0 (78—300°K)	[170] [123]	—1,6 (100)	[170]
GaN**2	—	—	—	—	—	—	0,6—0,10	[214]	—	—	—3,9	[242]	—	—
GaP	0,14 0,35 $m_{\perp}=0,22$ $m_{\parallel}=1,15$	[204] [170] [84] [84]	0,5 0,56	[170] [105]	0,13 0,18	[170] [105]	—	—	—	—	—5,5	[170]	—1,7 (100)	[170]
GaAs	1,2	[170]	0,5 0,5 0,475	[170] [232] [231]	0,87 0,089 0,091	[176] [232] [231]	0,5	[173]	0,523 0,37— 0,52	[170] [84]	—5	[170]	12,5 (000) —8,7 (100)	[186] [170]
GaSb	—	—	0,23 $m_{\perp}=0,36m_0$ $m_{\parallel}=0,26m_0$	[123] [233]	0,06 0,052	[123] [233]	0,39	[173]	—6	[184]	—3,5 —4,1	[170] [123]	12 (000) —10 (100) 7,3 (111)	[170] [170] [170]
InN	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
InP	—	—	0,2 0,60	[170] [105]	0,086 0,12	[170] [105]	—	—	—0,6	[230]	—4,6 —2,9	[170] [123]	4,6	[170]
InAs	—	—	0,4	[170]	0,025	[170]	0,33	[173]	—32 —14,7	[177] [84]	—2,2 —3,7	[170] [123]	4,8(000) 8,5(000) 3,2(111)	[170] [170]
InSb	—	—	0,04	[123]	0,015 0,0202	[123] [231]	0,2	[173]	—50 —48	[170] [84]	—2,8 —2,9	[170] [123]	15,5 (000) 14,2 (000)	[170] [170]

* См. примечание на с. 390

** $\rho \sim 5 \cdot 10^8$ ом·см [214].

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Литература	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{K}$	Литература	$E_g, \text{эВ}$	Литература	$\frac{dE_g}{dT}, \frac{\text{эВ}}{10^{-4} \text{град}}$
	Тип	$a, b, c, \text{\AA}$								
GaS	Гексагональная D_{6h}^4	$a = 3,585$ $c = 15,5$	[150] [150]	3,48	[150]	1298	[150]	2,5 2,95(0°K) 2,58(300°K)	[150, 260] [30] [30]	—7,2
GaSe	Гексагональная ^{2*} D_{6h}^4	$a = 3,755$ $c = 15,92$	[150] [150]	5,03	[150]	1233	[150]	1,95 2,1 1,97	[150] [150] [150]	—3,8 —4,0 —8,0
GaTe	Моноклинная ^{3*} C_2^1	$a = 11,95$ $b = 4,04$ $c = 14,82$	[150] [150] [150]	5,44—5,57	[150]	1108	[150]	1,05 1,7(300°K) 1,797(77°K)	[150] [152] [152]	—3,6 —4,35
InS	Орторомбическая D_{2h}^{12}	$a = 3,94$ $b = 4,44$ $c = 10,64$	[150] [150] [150]	5,18	[150]	965*	[150]	1,8	[150]	—6
InSe	Гексагональная ^{4*} D_{6h}^4	$a = 4,04$ $c = 16,90$	[150] [150]	5,55—5,72	[150]	933	[150]	1,2	[150]	—
InTe	Тетрагональная D_{4h}^{18}	$a = 8,437$ $c = 7,139$	[150] [150]	6,29	[150]	966	[150]	—	—	—
TiS	Тетрагональная D_{4h}^{18}	$a = 7,79$ $c = 6,79$	[150] [150]	7,61	[150]	623*	[150]	0,57	[10]	—
TiSe	Тетрагональная D_{4h}^{18}	$a = 8,03$ $c = 7,01$	[150] [150]	8,62—9,05 8,31	[39] [150]	573	[150]	0,574 0,65 0,57 0,7	[14] [150] [32] [32]	—1,19 —3,9
TlTe	Тетрагональная	$a = 12,94$ $c = 6,158$	[150] [150]	8,42	[150]	603*	[150]	—	—	—
SmS	Кубическая O_h^5	$a = 5,97 \div 5,93$	[242]	5,64	[62]	—	—	0,22(300°K) 0,24	[89] [62]	—
SmSe	Кубическая O_h^5	$a = 6,200$	[62]	6,42	[62]	1970	[64]	0,72	[64]	—
SmTe	Кубическая O_h^5	$a = 6,594$ $a = 5,97; 5,93$	[62] [242]	6,441	[62]	—	—	0,70(300°K)	[62]	—
EuO	—	—	—	—	—	—	—	1,12(300°K)	[62]	—4,7
EuS	Кубическая O_h^5	$a = 5,969$	[62]	5,88	[62]	—	—	1,65(300°K)	[62]	—1,7
EuSe	Кубическая O_h^5	$a = 6,185$	[62]	6,42	[62]	—	—	1,78 (300°K) 1,85 (300°K)	[62]	—3,2
EuTe	Кубическая O_h^5	$a = 6,585$	[62]	—	—	—	—	2,0(300°K)	[62]	—2
YbSe	Кубическая O_h^5	$a = 5,963$ $a = 5,87$	[62] [1]	—	—	—	—	0,17	[64]	—
YbTe	Кубическая O_h^5	$a = 6,36$ $a = 6,34$	[62] [1]	—	—	—	—	0,3	[64]	—

* Перитектическая точка.

^{2*} Может кристаллизоваться в ромбоэдрическую структуру C_3^5 ($a = 3,755 \text{\AA}$, $c = 23,92 \text{\AA}$) [150].

^{3*} Может кристаллизоваться в гексагональную структуру D_{6h}^4 ($a = 4,06 \text{\AA}$, $c = 16,96 \text{\AA}$) [150].

^{4*} Может кристаллизоваться в ромбоэдрическую структуру C_3^5 ($a = 4,02 \text{\AA}$, $c = 25,04 \text{\AA}$) [150].

Лите- ратура	Тип про- водимости	Лите- ратура	$\mu_n \cdot \frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$	Лите- ратура	$\mu_p \cdot \frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$	Лите- ратура	$\alpha, \frac{\text{мкв}}{\text{град}}$	Лите- ратура	Примечания	Лите- ратура
[260]	p	[150]	$\mu_n/\mu_p = 8$	[151]	5—10	[150]	150	[150]	$\mu_n/\mu_p = 8$	[151]
[242] [10] [260]	p	[150]	—	—	$30(T^{-1,6})$ 20	[30] [150]	200	[150]	$\epsilon_\infty = 5,7$ $\epsilon_0 = 7,0$	[215] [132]
[31] [152]	p	[150]	$14 \cdot \left(\frac{T}{300}\right)^{1/2}$ ($T < 350^\circ\text{K}$)	[31] [242]	15 40	[152] [150]	1000	[150]	—	—
[10]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	n	[150]	900	[150]	—	—	200—500	[150]	—	—
—	p	[150]	—	—	—	—	100	[150]	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
[14] [32]	n, p	[32, 150]	30	[123]	—	—	400	[150]	$m_{dn} = 0,3m_0$ $m_{dp} = 0,6m_0$ $n_i = 10^{18} \text{ см}^{-3}$	[32] [32]
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	$10(T^{-3/2})$ 37	[89] [72]	—	—	—	—	$m_n = 0,78m_0$	[89]
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	26	[62]	—	—
[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\epsilon_0 = 9,8$	[62]
[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\epsilon_0 = 10,2$	[62]
[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\epsilon_0 = 10,5$	[62]
[62]	—	—	44	[62]	—	—	—	—	$\epsilon_0 = 11,2$	[62]
—	—	—	—	—	0,3	[64]	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Свойства примесей в соединениях $A^{III}B^V$

Соединение	E_D , эВ*	Литература	E_A , эВ**	Литература
AlSb	0,27 (Se); 0,13 (Te)	[170]	—	—
GaP ^{3*}	Доноры: Se, Te	[170]	Акцепторы: Zn, Cd	[170]
GaAs ^{3*}	~0 (Se, Te)	[170]	0,0125 (Au) 0,098 (Mn) 0,014 (Zn) 0,021 (Cd) 0,0125 (Mg)	[123] [123] [170] [170] [170]
GaSb	0,075 (S) ~0 (Se, Te)	[214] [214]	0,037 (Zn)	[170]
InP ¹	~0 (Se, Te)	[170]	0,03 (Cd, Zn)	[170]
InAs	~0 (Te, Se, S, Cu)	[170, 123]	Акцепторы: Zn, Cd, Mg	[170]
InSb	~0 (Te, Se, S)	[170]	0,0075 (Zn) 0,0075 (Cd) 0,034 (Au) 0,066 0,023 0,039 (Ag)	[170] [170] [170] [170]

* Энергия ионизации доноров.

** Энергия ионизации акцепторов.

** Si может быть как акцептором, так и донором.

Соединения $A^{III}B^{VI}$. Наиболее изученные полупроводниковые соединения III и VI групп обладают стехиометрическим составом двух типов: $A^{III}B^{VI}$ и $A_2^{III}B_3^{VI}$ и имеют много кристаллических модификаций.

Соединения $A^{III}B^{VI}$ делятся на два класса.

1. Соединения с гексагональной структурой D_{6h}^4 — GaS, GaSe, GaTe, InSe. Халькогениды галлия — полупроводники p -типа, InSe — n -типа. Все эти соединения обладают диамагнитными свойствами. В GaS, InSe и GaSe — непрямая зонная структура с максимумом валентной зоны, расположенным при $k = 0$ [99, 150].

2. Соединения с тетрагональной структурой D_{4h}^{18} — InTe, TiSe, TiS, из которых первые два — полупроводники p -типа. По физическим свойствам эти соединения близки к соединениям первого класса, но не обладают диамагнетизмом и имеют более низкие значения E_g .

Соединения $A_2^{III}B_3^{VI}$ имеют малую подвижность носителей (следствие дефектной структуры [150]) и обладают, как правило, проводимостью n -типа (за счет избыточного числа атомов халькогена). Эти соединения мало чувствительны к легированию другими примесными атомами. Многие из этих соединений кристаллизуются в структуры нескольких типов, параметры которых приведены в табл. 21.18. На рис. 21.84 представлены температурные зависимости электрофизических свойств (типичного для этой группы) соединения In_2Te_3 .

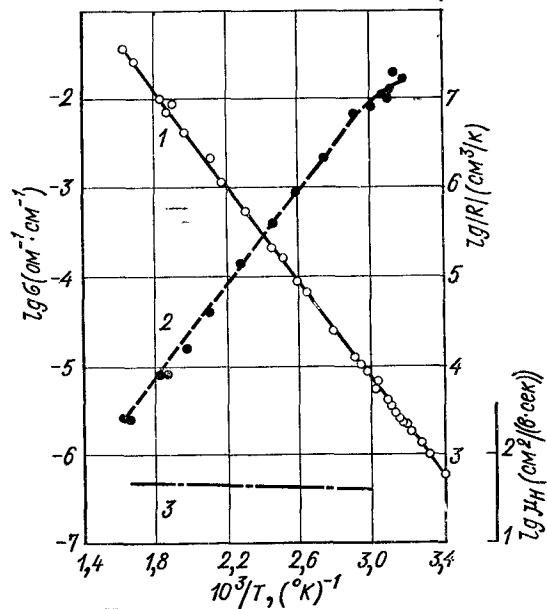


Рис. 21.84. Зависимость удельной проводимости σ (1), постоянной Холла R (2) и холловской подвижности μ_H (3) в In_2Te_3 от температуры [16].

О халькогенидах редкоземельных элементов подробнее см. работу [62]. Сульфиды редкоземельных элементов состава Lp_2X_3 имеют n -тип проводимости, селениды — p -тип и $\mu_n/\mu_p \sim 0,5$ [62]. Халькогениды редкоземельных элементов состава Lp_3X_4 представляют собой полупроводники с E_g близкой к E_g соответствующих халькогенидов состава Lp_2X_3 (1,6 — 3,0 эВ). Для разных соединений этого типа значения эффективных масс плотности состояний и коэффициенты термоэ. д. с. близки и составляют: $m_d \sim (2,0 \pm 0,5)m_0$; $\alpha \sim (20 \pm 10) \text{ мкВ/град}$ (подробнее см. [62]). Халькогениды редкоземельных элементов могут обладать магнитным порядком (ферро- или антиферромагнитное упорядочение) [62].

Известны соединения Tl_2S с $E_g = 1 \text{ эВ}$ (300° С) и Tl_2Te с $E_g = 0,5 \text{ эВ}$ (300° К). Tl_2S обладает гексагональной кристаллической структурой типа C_3^4 ($a = 12,2 \text{ \AA}$; $c = 18,2 \text{ \AA}$) и плавится при $T = 443^\circ \text{ С}$ [242].

Полупроводниковыми свойствами обладает соединение UO_2 ($E_g = 1,3 \text{ эВ}$ [87], $\mu_p = 10 \text{ см}^2/(\text{в·сек})$ [249]; O_h^5 , $a = 5,46 \text{ \AA}$ [1]).

Кристаллическая структура соединений $A_2^{III}B_3^{VI}$
[62, 121, 150, 242]

Соединение	Кристаллическая структура	$a, b, c, \text{\AA}$
Al_2O_3	α -Гексагональная D_{3d}^6	$a = 4,758;$ $c = 12,95$
	γ -Кубическая	$a = 7,92; 3,42$
Al_2Se_3	α -Гексагональная (тип вюрцита) C_{6v}^4	$a = 3,89;$ $c = 6,30$
	α -Моноклинная	$a = 11,68;$ $b = 6,73$ $\beta = 121^\circ, 1;$ $c = 7,33$
Al_2Te_3	Гексагональная (тип вюрцита) C_{6v}^4	$a = 4,08;$ $c = 6,94$
$Ga_2S_3^*$	α -Моноклинная	$a = 11,14;$ $b = 6,41$ $\beta = 121^\circ, 22;$ $c = 7,04$
	α -Гексагональная упорядоченная	$a = 6,38$ $c = 18,09$
$\alpha \rightarrow \beta (600^\circ\text{C})$	β -Гексагональная неупорядоченная (тип вюрцита) C_{6v}^4	$a = 3,68;$ $c = 6,03$
$\beta \rightarrow \gamma (1015^\circ\text{C})$	α -Кубическая (тип сфалерита) T_d^2	$a = 5,17$
$GaSe_3^*$	α -Кубическая (тип сфалерита) T_d^2	$a = 5,43$
$\alpha \rightarrow \beta (600^\circ\text{C})$	β -Тетрагональная	$a = 5,487;$ $c = 5,411$
$\beta \rightarrow \gamma (800^\circ\text{C})$	γ -Орторомбическая	$a = 7,76;$ $b = 11,64;$ $c = 10,82$
$\gamma \rightarrow \delta (?)$	δ -Кубическая (тип сфалерита) T_d^2	$a = 5,46$
Ga_2Te_3	α -Кубическая (тип сфалерита) T_d^2	$a = 5,89$
In_2O_3	Кубическая T^b	$a = 10,118$

Соединение	Кристаллическая структура	$a, b, c, \text{\AA}$
$In_2S_3^*$ $\alpha \rightarrow \beta (300^\circ\text{C})$	α -Кубическая (тип γ' - Al_2O_3) O_h^5	$a = 5,36$
	β -Кубическая (тип γ' - Al_2O_3) O_h^5	$a = 10,72$
	β -Тетрагональная	$a = 7,62;$ $c = 32,32$
$In_2Se_3^*$ $\alpha \rightarrow \beta (200^\circ\text{C})$	α -Гексагональная	$a = 16,0;$ $c = 19,24$
	β -Гексагональная (тип вюрцита) C_{6v}^4	$a = 7,1;$ $c = 19,3$
$\beta \rightarrow \gamma (650^\circ\text{C})$	γ -Кубическая (тип сфалерита) T_d^2	$a = 10,10$
$\gamma \rightarrow \delta (750^\circ\text{C})$	δ -Моноклинная	—
$In_2Te_3^*$ $\alpha \rightarrow \beta (600^\circ\text{C})$	α -Кубическая упорядоченная (тип сфалерита) T_d^2	$a = 18,40$
	β -Кубическая неупорядоченная	$a = 6,16$
Y_2S_3	Моноклинная	$a = 17,52;$ $b = 4,019;$ $c = 10,97$
La_2S_3	γ -Кубическая	$a = 8,723$
	α -Орторомбическая	$a = 7,584;$ $b = 15,86;$ $c = 4,144$
La_2Se_3	Кубическая	$a = 4,055$
La_2Te_3	Кубическая	$a = 9,627;$ $9,619$
Ce_2S_3	γ -Кубическая	$a = 8,634$
	α -Орторомбическая	$a = 7,513;$ $b = 15,715;$ $c = 4,094$
Ce_2Se_3	Кубическая	$a = 8,973$
Ce_2Te_3	Кубическая	$a = 9,539$

* Указан возможный переход и температура, при которой он происходит.

Соединение	Кристаллическая структура	$a, b, c, \text{Å}$
Pr_2S_3	γ -Кубическая	$a = 8,527$
	α -Орторомбическая	$a = 7,472;$ $b = 15,604;$ $c = 4,058$
Pr_2Se_3	Кубическая	$a = 8,927$
Pr_2Te_3	Кубическая	$a = 9,481$
Nd_2S_3	γ -Кубическая	$a = 8,527$
	α -Орторомбическая	$a = 7,442;$ $b = 15,519;$ $c = 4,029$
Nd_2Se_3	Кубическая	$a = 8,859$
Nd_2Te_3	γ -Кубическая	$a = 9,453$
	Орторомбическая	$a = 12,16;$ $b = 11,93;$ $c = 4,34$
Sm_2S_3	γ -Кубическая	$a = 8,448$
	α -Орторомбическая	$a = 7,38;$ $b = 15,378;$ $c = 3,974$
Sm_2Se_3	Кубическая	$a = 8,784$
Sm_2Te_3	γ -Кубическая	$a = 9,480$
	Орторомбическая	$a = 12,06;$ $b = 4,34;$ $c = 4,34$
Gd_2S_3	γ -Кубическая	$a = 8,387$
	α -Орторомбическая	$a = 7,338;$ $b = 15,273;$ $c = 3,932$
Gd_2Se_3	γ -Кубическая	$a = 8,717$
	Орторомбическая	$a = 11,18;$ $b = 10;$ $c = 4,05$

Соединение	Кристаллическая структура	$a, b, c, \text{Å}$
Gd_2Te_3	Орторомбическая	$a = 11,96;$ $b = 11,75;$ $c = 4,29$
Dy_2S_3	γ -Кубическая	$a = 8,292$
	δ -Моноклиническая	$a = 7,279;$ $b = 15,316;$ $c = 3,878$
Dy_2Te_3	Орторомбическая	$a = 12,216;$ $b = 8,637;$ $c = 25,911$
Ho_2S_3	Моноклиническая	$a = 17,45;$ $b = 4,0;$ $c = 10,128$
Er_2S_3	Моноклиническая	$a = 17,4;$ $b = 3,98;$ $c = 10,09$
Er_2Se_3	Орторомбическая	$a = 11,35;$ $b = 8,10;$ $c = 24,17$
Er_2Te_3	Орторомбическая	$a = 12,134;$ $b = 8,579;$ $c = 25,737$
Yb_2S_3	Ромбоэдрическая	$a = 6,748;$ $c = 18,191$
Yb_2Se_3	Орторомбическая	$a = 11,27;$ $b = 8,602;$ $c = 23,96$

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $A_2^{III}B_3^{VI}$

Соединение	$\rho, \frac{\text{з}}{\text{см}}$	Лите- ра-тура	$T_{пл},$ °K	Лите- ра-тура	$E_g, \text{ эв}$	Лите- ра-тура	$\frac{\partial E_g}{\partial T} \cdot 10^{-4} \frac{\text{эв}}{\text{град}}$	Лите- ра-тура	Тип про- водности	Лите- ра-тура	$\mu_n, \frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$	Лите- ра-тура	$\mu_p, \frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$	Лите- ра-тура	Примечание	Лите- ра-тура
$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	—	—	2323	[242]	2,50	[242]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$\alpha\text{-Al}_2\text{S}_3$	2,32	[242]	1373	[242]	4,1	[242]	$-11,5$ (90—373°K)	[242]	—	—	—	—	—	—	—	—
$\alpha\text{-Al}_2\text{Se}_3$	3,91	[150]	1253	[150]	3,1	[150]	—11,2	[10]	n	[150]	—	—	—	—	—	—
Al_2Te_3	4,5	[150]	1168	[150]	2,2 2,5	[150] [123]	—		n	[150]	—	—	—	—	$\alpha = 270 \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$	[150]
$\beta\text{-Ga}_2\text{S}_3$	3,65— 3,74	[150]	1398	[150]	2,5—2,7 3,06 2,84(300°K)	[150] [150] [123]	—6,7(90—293°K) —7 —8(293—373°K)	[242] [58] [242]	n	[150]	28	[150]	—	—	$\alpha = 900 \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$	[150]
Ga_2Se_3^*	4,92 (α)	[150]	1293 (β)	[150]	1,75(α) 1,9(β)	[150] [121]	—5	[16]	$p(\alpha)$	[150]	10(α)	[16]	0,005 (α)	[147]	$\alpha = 400 \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$	[150]
$\alpha\text{-Ga}_2\text{Te}_3$	5,57	[150]	1065	[150]	1,56 1,4 1,2	[31] [150] [10]	—6,6(293—373°K) —5,4 (90—293°K)	[242] [242] [242]	p	[150]	50 26 340	[16] [150] [123]	0,0047	[150]	$m_n^* = 0,39m_0$ $m_p^* = 0,23m_0$ $\mu_p = 26 \frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$	[123] [123] [123]
In_2O_3	7,04	[132]	2270	[132]	2,8(300°K)	[132]	$-7,7$ (90°K < T < 293°K) $-8,4$ (293°K < T < 373°K)	[132] [132]	n	[60]	160 271	[242] [60]	—	—	$m_{nd}^* = 0,55m_0$	[60]
$\beta\text{-In}_2\text{S}_3$	5,92 4,63	[150] [121]	1363	[150]	1,13*	[150]	—6,8	[10]	n	[150]	<100	[150]	—	—	$\alpha = 700 \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$ $\epsilon = 13,3 \div 14,7$	[150] [242]
In_2Se_3^*	5,36(β) 5,67(α)	[150] [150]	1173(α)	[150]	1,0(β) 1,2(α)	[150] [10]	—4	[10]	$n(\alpha)$	[150]	125(α)	[150]	0,01(α)	[150]	$\alpha = 100 \div 800 \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$ (α)	[150]
In_2Te_3^*	5,8(α) 5,73(β)	[121] [121]	940(α)	[150]	1,02 (α, β) 1,12 (α, β)	[150] [16]	—5,6(293—373°K) —4,2(90—293°K) —3,4	[242] [242] [16]	n	[16]	10(α) 50(β) 15—70	[150] [150] [16]	0,0107 (α)	[150]	$\alpha = 500 \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$ (α) $m_n^* = 0,7m_0$ (α) $m_p^* = 1,1 m_0$	[150] [150] [150]

Соединение	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Литера-тура	$T_{пл}, \text{К}$	Литера-тура	$E_g, \text{эВ}$	Литера-тура	$\frac{dE_g}{dT}, 10^{-4} \frac{\text{эВ}}{\text{град}}$	Литера-тура	Тип про-водимости	Литера-тура	$\frac{\psi_{пл}}{V \cdot \text{сек}}$	Литера-тура	$\frac{dm}{dt}, \frac{\text{г}}{\text{см}^2 \cdot \text{град}}$	Литера-тура	Примечание	Литера-тура
Ti_2S_3	—	—	—	—	1,2	[10]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sc_2S_3	—	—	—	—	2,78	[180]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sc_2Se_3	—	—	—	—	2,31	[180]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Y_2S_3	3,87	[62]	—	—	2,9	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\epsilon_0 = 6,81$ $\epsilon_\infty = 13,1$	[62] [62]
La_2S_3	4,93	[62]	2423	[62]	1,32 2,7÷2,9	[62] [62]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\epsilon_0 = 8,12$ $\epsilon_\infty = 16,3; 19,6$	[62] [62]
La_2Se_3	6,15	[62]	2023	[62]	2,25 1,65	[62] [62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
La_2Te_3	6,53 6,4	[62] [62]	1868	[62]	2,00	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ce_2S_3	5,15	[62]	2473	[62]	1,12 2,6; 2,2	[242] [62]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\epsilon_0 = 7,5; 6,25$ $\epsilon_\infty = 19,0$	[62] [62]
Ce_2Se_3	6,17	[62]	2323	[62]	1,62 1,8÷2,0	[242] [62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ce_2Te_3	6,6	[62]	2073	[62]	1,3—1,7 1,6	[242] [62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pr_2S_3	5,27	[62]	2323	[62]	1,1 2,2; 2,5—2,7	[242] [62]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\epsilon_\infty = 14,2$	[62]
Pr_2Se_3	6,51	[62]	—	—	2,15 1,81	[62] [97]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pr_2Te_3	6,6	[62]	—	—	1,2—1,6 1,3—1,7	[242] [62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Nd_2S_3	5,36	[62]	2283	[62]	1,06 2,1; 2,7	[242] [62]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\epsilon_\infty = 16,0$	[62]
Nd_2Se_3	6,70	[62]	—	—	2,2 1,6	[62] [97, 62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Соединение	$\rho, \frac{\text{э}}{\text{см}^3}$	Литера-тура	$T_{\text{пл}}, \text{°K}$	Литера-тура	$E_g, \text{эВ}$	Литера-тура	$\frac{dE_g}{dT} \cdot 10^{-4} \frac{\text{эВ}}{\text{град}}$	Литера-тура	Тип про-водимости	Литера-тура	$\mu_n, \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{сек}}$	Литера-тура	$\chi, \frac{\text{В}}{\text{см} \cdot \text{град}}$	Литера-тура	Примечание	Литера-тура
Nd_2Te_3	6,94	[62]	1923	[62]	0,8—1,0 0,8—1,12	[242] [62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sm_2S_3	5,87	[62]	2173	[62]	3,0 2,96	[62] [96]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\epsilon_\infty = 18,0$	[62]
Sm_2Se_3	6,93	[62]	~1813	[62]	2,3—2,5	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sm_2Te_3	—	—	1773	[62]	0,7	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Gd_2S_3	6,14	[62]	—	—	2,55 2,2	[62] [62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Gd_2Se_3	6,90	[62]	2023	[62]	2,2	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Gd_2Te_3	7,42	[62]	1773	[62]	0,74 0,7	[62] [64]	—	—	—	—	60 ^{2*}	[64]	—	—	—	—
Dy_2S_3	6,50	[62]	1773	[62]	2,94	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Dy_2Te_3	—	—	1783	[62]	0,7	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ho_2S_3	—	—	—	—	2,7 ₁₎	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\epsilon_0 = 6,92$ $\epsilon_\infty = 14,9$	[62]
Er_2S_3	6,09	[62]	—	—	2,8	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Er_2Se_3	6,83	[62]	1793	[62]	0,83	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Er_2Te_3	—	—	1733	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Yb_2S_3	6,02	[62]	—	—	2,5	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\epsilon_0 = 6,81$ $\epsilon_\infty = 15,1$	[62]
Yb_2Se_3	7,15	[62]	—	—	3,2	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Представлены две модификации (α и β).^{2*} $\mu_p = 18 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{сек})$ [64].^{8*} Значение $E_g = 1,1 \text{ эВ}$ соответствует непрямым переходам. Для прямых переходов $E_g = 2,4 \text{ эВ}$ [150].

Соединения типа $A^{IV} B^{IV} - A^{IV} B^{VI}$

Таблица 21.20

Полупроводниковые соединения типа $A^{IV} B^{IV*}$
Свойства α -и β -SiC

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	$T_{пл}, ^\circ K$	Литература	$\rho, \frac{г}{см^3}$	Литература	$T_D, ^\circ K$	Литература	$\hbar\omega_l, эв$	Литература	$\hbar\omega_t, эв$	Литература	ϵ_0	Литература	ϵ_8	Литература	
	Тип	$a, b, c, \text{ \AA}$																
α -SiC	Гексагональная C_{6v}^4	$a = 3,07$ $c = 37,7$ (15,07)	[1] [1]	3073	[132]	3,21	[193]	1200	[193]	0,119	[194]	0,098	[194]	10,2 9,8	[124] [194]	6,9 6,73	[124] [194]	
β -SiC	Кубическая T_d^2	$a = 4,36$	[1]	2600 ^{2*}	[124]	3,21	[132]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Соединение	$E_g, эв$	Литература	$\frac{dE_g}{dT}, 10^{-4} \frac{эв}{град}$	Литература	$\frac{m_n}{m_0}$	Литература	$\frac{m_p}{m_0}$	Литература	$\mu_n, \frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	$\mu_p, \frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	g_n	Литература	g_p	Литература	$\chi, \frac{вт}{см \cdot град}$	Литература
α -SiC	3,0	[5, 8]	—3,81	[85]	0,6	[124]	1,2 1,0	[124] [123]	230 200	[34] [49]	70	[16]	2,003	[124]	2,004	[124]	0,55— 0,57	[195]
β -SiC	2,68	[15, 79]	—5,8	[15, 79]	0,25	[73]	$n_d = 0,59 m_0$	[15]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Для GeSi $E_g = 0,88 эв$ (300°K), для SnGe $E_g = 0,4 эв$ (300°K), для SiSn $E_g = 0,59 эв$ (300°K) [242].** При этой температуре происходит переход β -SiC $\rightarrow$ α -SiC [124]. Температурные зависимости постоянной Холла и подвижности в SiC представлены на рис. 21.85, 21.86.

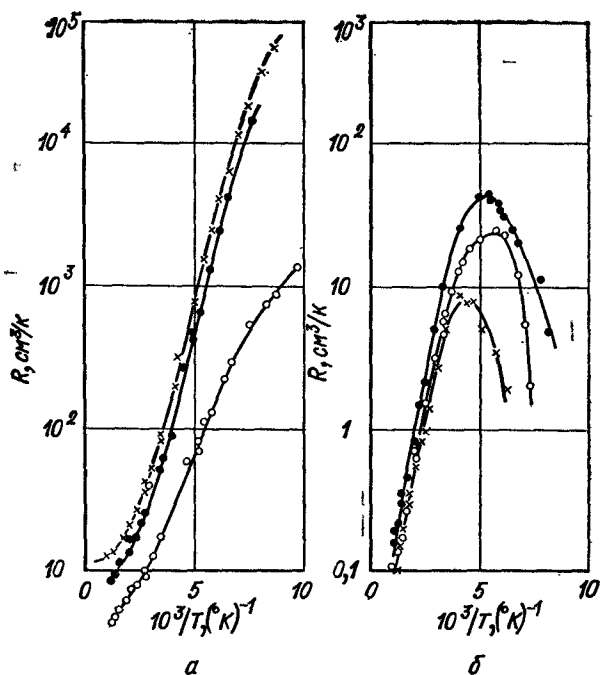


Рис. 21.85. Зависимость постоянной Холла в SiC от температуры для зеленых (а) и черных (б) образцов n -типа [224].

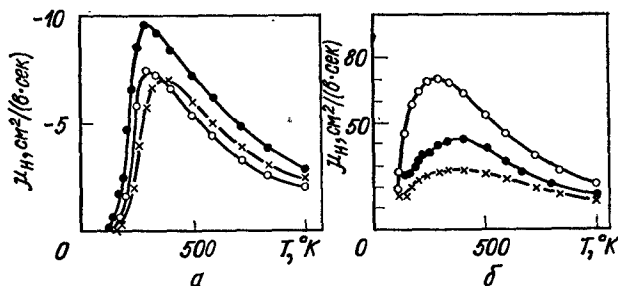


Рис. 21.86. Зависимость холловской подвижности μ_H в SiC от температуры для зеленых (а) и черных (б) образцов n -типа [224].

Полупроводниковые соединения $A^{IV}B^{VI}$

Из соединений этого типа известно Sn_3As_2 , кристаллизующееся в ромбоэдрической решетке. Температура плавления $T_{пл} = 871^\circ K$, ширина запрещенной зоны $E_g = 0.47$ эв, подвижность дырок $\mu_p = 270$ $cm^2/(V \cdot сек)$ [100].

Наиболее изученными соединениями этого типа являются халькогениды свинца (PbS , $PbSe$, $PbTe$), кристаллизующиеся в гранецентрированной кубической решетке (O_h^5). Зонная структура — прямая, причем абсолютные экстремумы зон расположены на краю зоны Бриллюэна в направлении $[111]$ (рис. 21.87). Вблизи экстремумов поверхности постоянной энергии представляют собой эллипсоиды вращения (их эквивалентное

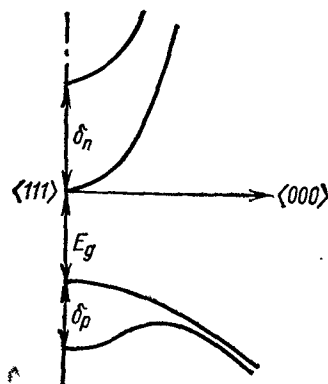


Рис. 21.87. Зонная структура PbS , $PbSe$, $PbTe$ [125].

число — 4 для каждой зоны). Валентная зона расщеплена на две подзоны; нижняя из них (подзона тяжелых дырок) имеет максимумы внутри зоны Бриллюэна на осях $[111]$ и проявляет себя в материалах p -типа при повышенных температурах (для $PbTe$ при $T > 400^\circ K$). Халькогениды свинца обладают аномально высокой диэлектрической проницаемостью. Электрофизические свойства халькогенидов свинца см. на рис. 21.88—21.101.

Некоторые соединения рассматриваемого типа характеризуются непрямой зонной структурой, как это имеет место, например, в $GeSe$, SnS , $SnSe$ [114]. Известно также, что валентные зоны в $GeTe$ и $SnTe$ состоят из двух подзон, разделенных энергетическим интервалом 0,3 эв [114].

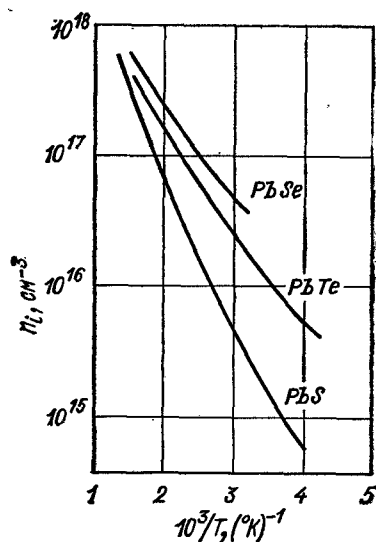
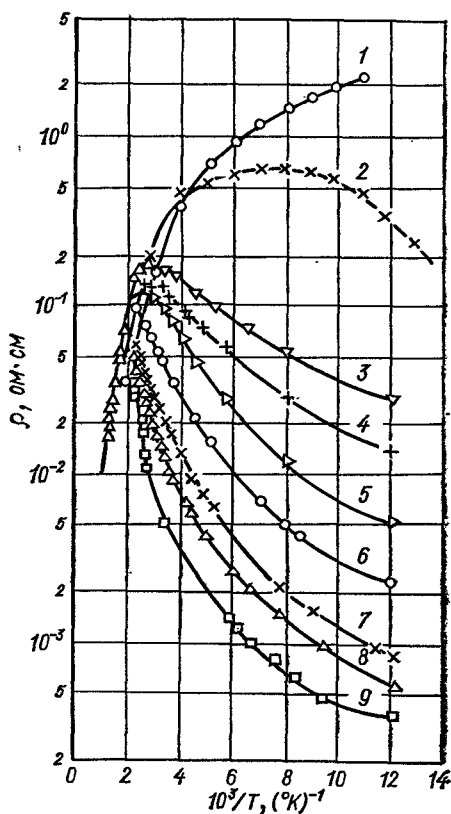
Тип проводимости рассматриваемых соединений часто определяется их отклонением от стехиометрии.

К соединениям типа $A^{IV}B^{VI}$ относится также TiO_2 (рутил) — полупроводник с поляронной проводимостью (прыжковая энергия 0,13 эв [212], 0,15—0,2 эв [25]), свойства которого представлены в табл. 21.21.

Свойств рутила (TiO_2)

Кристаллическая структура		$T_{пл}, ^\circ\text{K}$	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Литература	ϵ_0	ϵ_∞	Литература	$E_{сг}, \text{эВ}$	Литература	$\mu_n^*, \frac{\text{см}^2}{\text{В}\cdot\text{сек}}$	Литература	g	Литература	$T_D, ^\circ\text{K}$	Литература
Тип	$a, c, \text{\AA}$														
Тетрагональная D_{4h}^{14}	$a=4,54$ $c=2,96$	2113	4,28	[209]	$\perp c$ 89 $\parallel c$ 173 $\parallel c$ 260 $\perp c$ 140	$\perp c$ 9 $\parallel c$ 6,8 7	[25] [211]	3,0	[16]	$\perp c$ 0,16 $\parallel c$ 0,57	[25] [25]	$\parallel c$ 1,941 $\perp c$ 1,976	[213]	775 650 (10°K) 670 (68÷373°K)	[141] [242]

* Подвижность полирона.

Рис. 21.88. Зависимость собственной концентрации n_i носителей в PbS, PbTe, PbSe от температуры [125].Рис. 21.89. Зависимость удельного сопротивления ρ в PbTe от температуры [117]:1, 2 — почти собственные образцы;
3—9— p -PbTe.

Измерения постоянной Холла на тех же образцах (см. рис. 21.90).

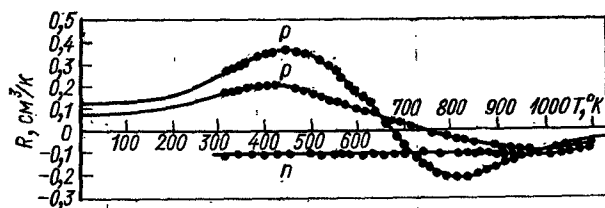
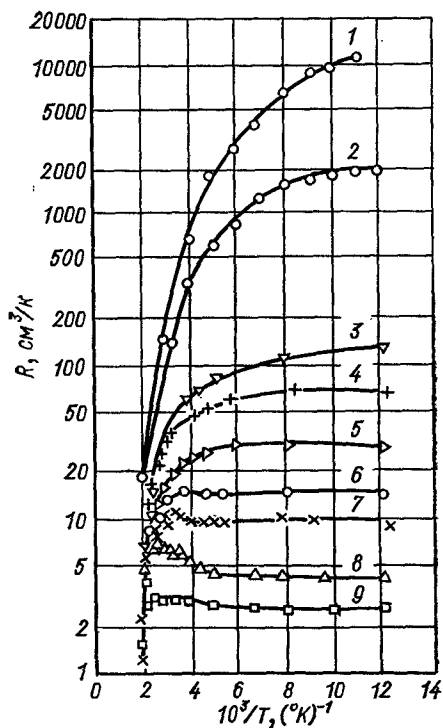


Рис. 21.91. Зависимость постоянной Холла R в сильно-легированных образцах PbTe от температуры [125].

Рис. 21.90. Зависимости постоянной Холла R от температуры [117]. Для $p\text{-PbTe}$ приведены только положительные ветви. Образцы те же, что и на рис. 21.89.

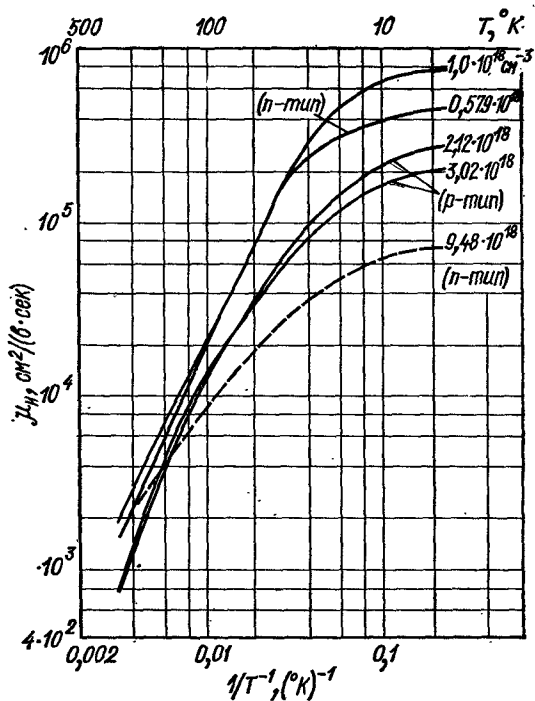


Рис. 21.92. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов и дырок в PbTe от температуры при различной концентрации носителей [117].

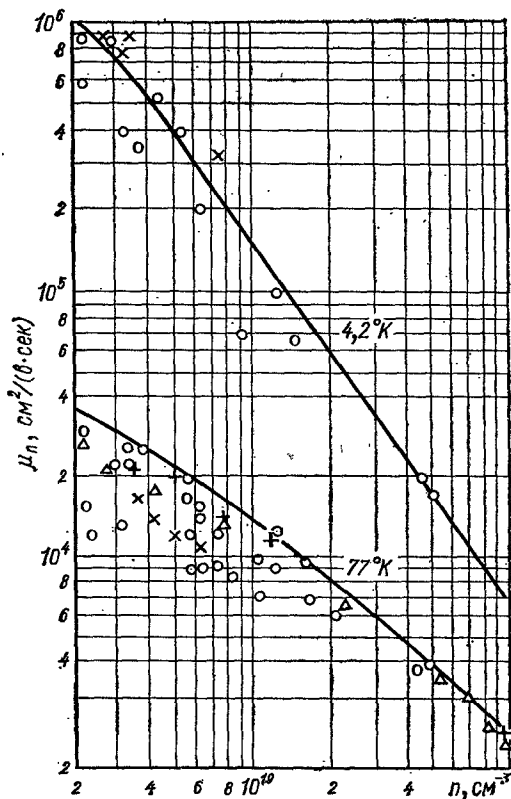


Рис. 21.93. Зависимость подвижности μ_n электронов от их концентрации n в PbTe [125]. Точки — данные различных авторов.

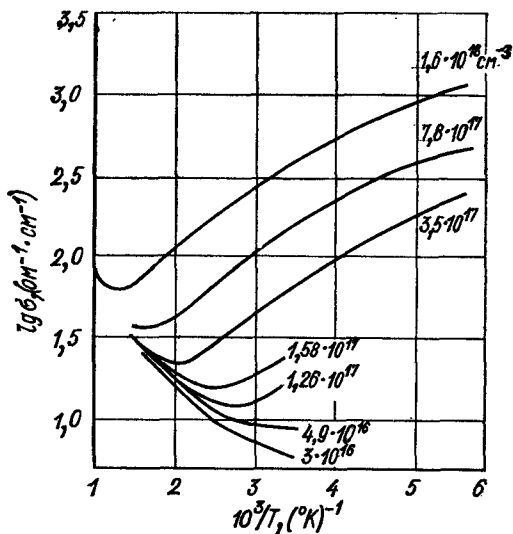


Рис. 21.94. Зависимость удельной проводимости в n -PbSe от температуры при различной концентрации доноров [117].

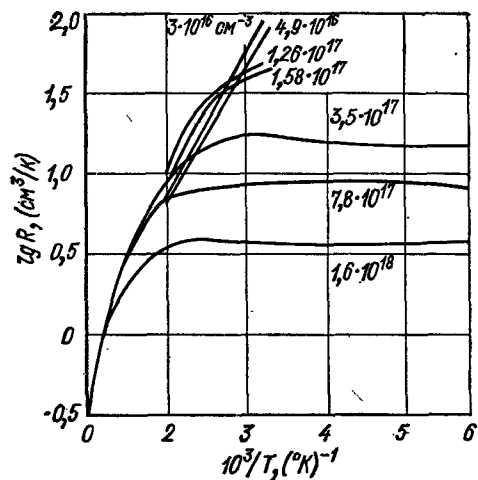


Рис. 21.95. Температурная зависимость постоянной Холла R в n -PbSe при различной концентрации доноров [117].

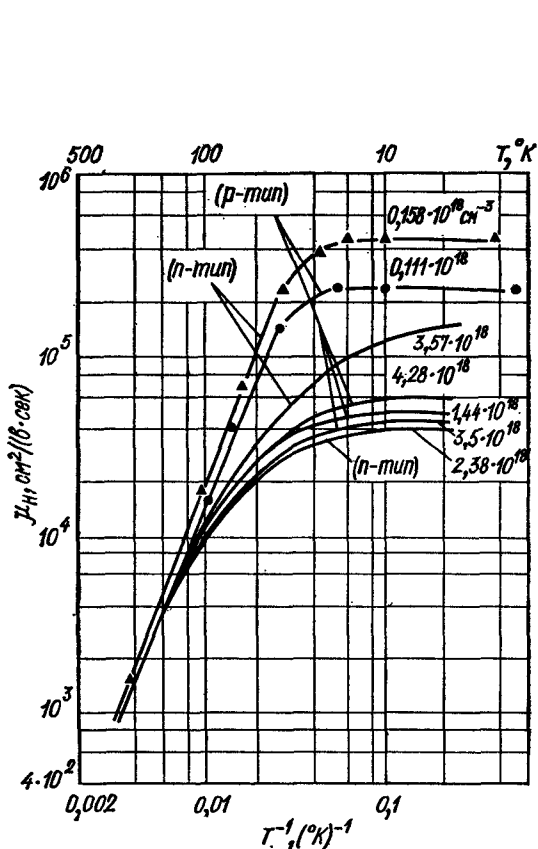


Рис. 21.96. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов и дырок в PbSe от температуры при различной концентрации носителей [117].

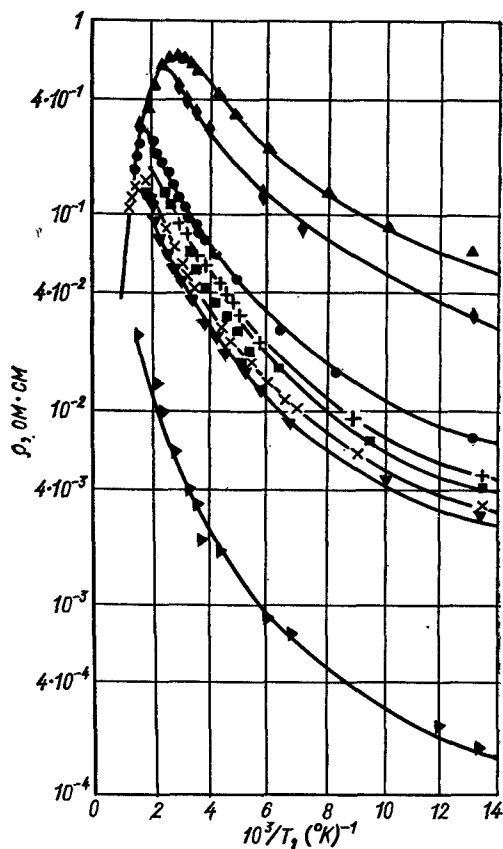


Рис. 21.97. Зависимость удельного сопротивления ρ в n -PbS от температуры [117]. Измерения постоянной Холла на тех же образцах, что и на рис. 21.98.

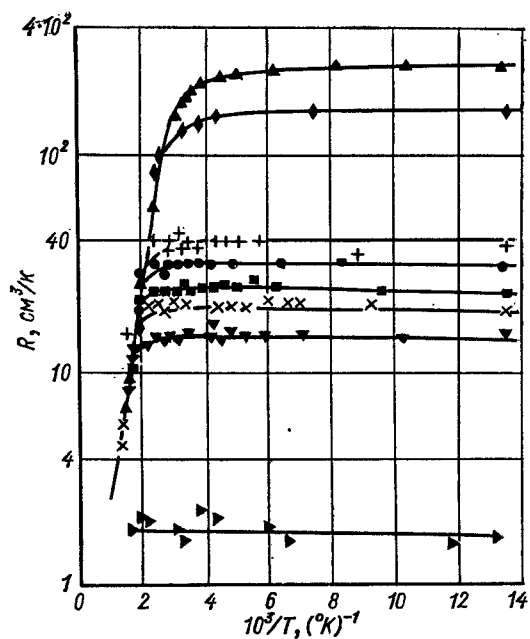


Рис. 21.98. Зависимость постоянной Холла R в n -PbS от температуры [117]. Образцы те же, что и на рис. 21.97.

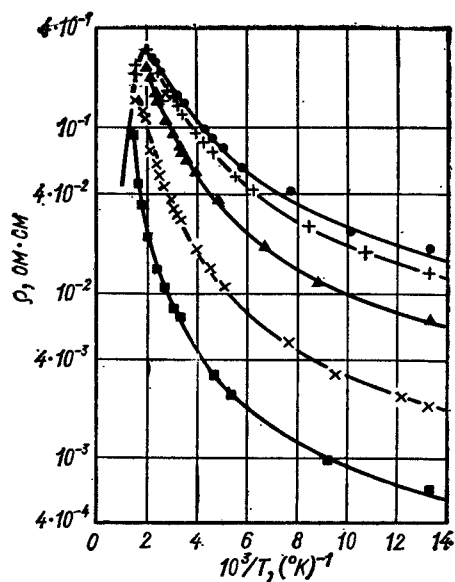


Рис. 21.99. Зависимость удельного сопротивления ρ в p -PbS от температуры [228]. Измерения постоянной Холла на тех же образцах, что и на рис. 21.100.

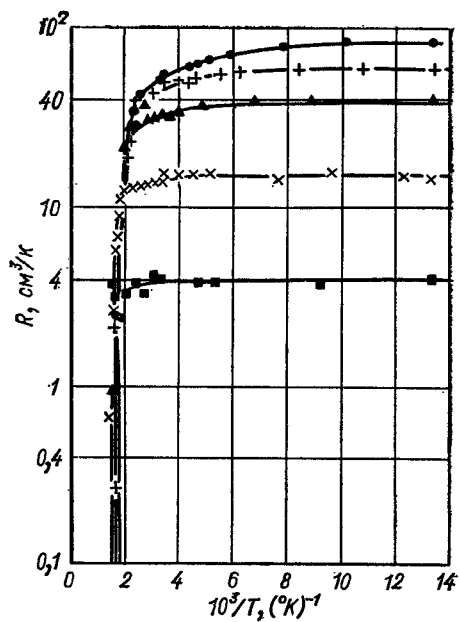


Рис. 21.100. Зависимость постоянной Холла R в p -PbS от температуры [228]. Образцы те же, что и на рис. 21.99.

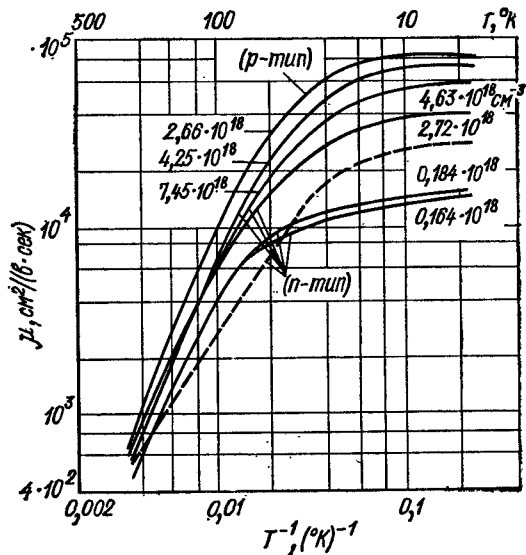


Рис. 21.101. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов и дырок в PbS от температуры при различной концентрации носителей [117].

Электрофизические свойства халькогенидов свинца (PbS, PbSe, PbTe) [125]

Соединение	Кристаллическая структура		$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{K}$	$E_g, \text{эВ}$	$\delta_n, \text{эВ}$	$\delta_p, \text{эВ}$	$\frac{dE_g}{dT}, 10^{-4} \frac{\text{эВ}}{\text{град}}$	$\frac{dE_g}{dP}, 10^{-4} \frac{\text{эВ}}{\text{бар}}$	$\frac{m_{\parallel p}}{m_0}$	$\frac{m_{\parallel n}}{m_0}$	$\frac{m_{\perp p}}{m_0}$	$\frac{m_{\perp n}}{m_0}$
	Тип	$a, \text{\AA}$											
PbS	Кубическая гранецен- трирован- ная O_h^5	5,94	8,2	1387	0,29 (4,2°K) 0,31 (77°K) 0,41 (300°K)	1,46	1,67	4	—8	0,105	0,105	0,075	0,080
PbSe	Кубическая гранецен- трирован- ная O_h^5	6,12	8,3	1335	0,165 (4,2°K) 0,176 (77°K) 0,29 (300°K)	1,36	1,72	4	—8	0,068	0,070	0,034	0,040
PbTe	Кубическая гранецен- трирован- ная O_h^5	6,50	7,6	1190	0,19 (4,2°K) 0,22 (77°K) 0,32 (300°K)	1,11	0,77	4*	—8	0,31*	0,24	0,022*	0,024

* Данные относятся к зоне легких дырок, для зоны тяжелых дырок $dE_g/dT = 0$, $m_{p2} = 1,2 \div 1,5 m_0$.

Соединение	$\mu_n, \frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$	$\mu_p, \frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$	$n_i (300^\circ\text{K}), \text{см}^{-3}$	ϵ_0	ϵ_8	$\hbar \omega_{\text{Л}}, \text{эВ}$	$\hbar \omega_{\text{П}}, \text{эВ}$	$T_D (200^\circ\text{K}), ^\circ\text{K}$	$\alpha, \frac{\text{см}}{\text{см} \cdot \text{град}}$	$g_{\text{П}}$	$g_{\text{ПР}}$
PbS	68 500 (4,2 °K) 11 000 (77 °K) 610 (300 °K)	80 000 (4,2 °K) 15 000 (77 °K) 620 (300 °K)	$2,0 \cdot 10^{16}$	175	17	0,0263	0,082	227	0,025	12	13
PbSe	139 000 (4,2 °K) 16 500 (77 °K) 1000 (300 °K)	57 900 (4,2 °K) 13 700 (77 °K) 1000 (300 °K)	$3,0 \cdot 10^{16}$	250	24	0,0165	0,0054	138	0,016	27	32
PbTe	800 000 (4,2 °K) 31 600 (77 °K) 1730 (300 °K)	250 000 (4,2 °K) 21 600 (77 °K) 840 (300 °K)	$1,5 \cdot 10^{16}$	400	33	0,0136	0,0039	125	0,02	45	51

* || — параллельно большой оси эллипсоида энергии.

Таблица 21.23

Электрофизические свойства соединений типа $A^{IV}B^{VI}$

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	$\frac{e}{\rho, \text{см}^3}$	Литература	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{K}$	Литература	$T_D, ^\circ\text{K}$	Литература	$E_g, \text{эВ}$	Литература	Тип проводимости	Литература
	Тип	$a, b, c, \text{\AA}$											
SiTe ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,03 (300°K)*	[174]	—	—
Si ₂ Te ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,98 ² *	[53]	—	—
GeS	Ортором- бическая D_{2d}^{16}	$a=4,30$ $a=10,44$ $c=3,65$	[1] [1] [1]	4,012	[114]	898	[35]	—	—	1,8 (300°K) 1,77	[114] [165]	—	—
GeSe	Ортором- бическая	$a=3,82$ $b=10,79$ $c=4,38$	[1] [1] [1]	5,52	[114]	943	[114]	—	—	1,0 1,16 (300°K)	[8] [114]	p	[114]
GeSe ₂	Ромбичес- кая	$a=6,94$ $b=12,19$ $c=22,99$	[242] [242] [242]	—	—	1013	[242]	—	—	2,3	[242]	—	—

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Литература	$T_{пл}, ^\circ\text{K}$	Литература	$T_D, ^\circ\text{K}$	Литература	$E_g, \text{эВ}$	Литература	Тип проводимости	Литература
	Тип	$a, b, c, \text{\AA}$											
GeTe ^{3*}	Кубическая	$a=6,02-5,094^{4*}$	[114]	6,19	[114]	993	[114]	166	[164]	0,5—1,0 (300°K) 0,27 0,23 1 ($E_{опт}$)	[114] [257] [203] [203]	p	[258]
SnO ₂	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$a=4,72$ $c=3,17$	[1] [1]	6,95	[216]	1400 ^{5*}	[216]	500	[69]	3,97	[93]	n	[60]
SnS	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$a=3,98$ $b=4,33$ $c=11,18$	[1] [1] [1]	5,08	[114]	1155	[216]	270 (80°K)	[114]	1,07	[3]	p	[114]
SnS ₂	Тригональная D_{3d}^3	$a=3,64$ $c=5,87$	[1] [1]	4,5	[216]	—	—	—	—	2,07 ^{6*}	[183]	—	—
SnSe ^{7*}	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$a=4,19$ $b=11,57$ $c=4,16$	[1] [1] [1]	6,179	[114]	953 ^{8*}	[39]	210 (80°K)	[114]	0,889 ^{9*} 0,88	[39] [3]	p	[114]
SnSe ²	Тригональная	—	[1]	5,13	[216]	923	[216]	—	—	0,97 ^{6*}	[183]	—	—
SnTe ^{10*}	Кубическая O_h^5	$a=6,28$	[1]	6,45	[114]	1079	[114]	140	[114]	0,26 (300°K)	[114]	p	[114]

Соединение	m_p / m_0	Литература	$\mu_n, \frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$	Литература	$\mu_p, \frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$	Литература
Si ₂ Te ₂	—	—	—	—	—	—
Si ₂ Te ₃	—	—	—	—	—	—
GeS ₂	—	—	—	—	—	—
GeSe	—	—	—	—	70 (T^{-2}) 60	[114] [8]

Соединение	m_p/m_0	Литература	$\mu_n, \frac{\text{см}^2}{\text{в.сек}}$	Литература	$\mu_p, \frac{\text{см}^2}{\text{в.сек}}$	Литература
GeSe ₂	—	—	—	—	—	—
GeTe	$m_1=1,15^{11*}$ $m_2=5,0$	[114] [258]	130	[203]	55 150	[258] [126]
SnO ₂	12*	—	200—300 ($\sim T^{-1,1}$) 80 315	[69] [5] [60]	300	[69]
SnS	$m_d=0,95$ $m_{\perp}=0,2$ $m_{\parallel}=1,0$	[127] [127] [127]	—	—	$\perp c$ 90 ($\sim T^{-2,2}$) ^{13*} 65	[127] [4]
SnS ₂	—	—	—	—	—	—
SnSe	$m_d=0,15$	[15, 39]	—	—	$\perp c$ 110 ^{13*} 80	[114] [3]
SnSe ₂	—	—	27	[183]	—	—
SnTe	$m_1=0,13$ $m_1=0,4$ $m_n=0,1$ $m_2=3,0$ $m_2=1,85$	[205] [8] [206] [7] [205]	—	—	$\mu_1=3500$ (100°K) $\mu_1=1700$ $\mu_2=50^{14*}$	[114] [181] [114]

$$1^* \frac{\partial E_g}{\partial T} = -1,225 \cdot 10^{-3} \text{ эв/град [174].}$$

$$2^* \frac{\partial E_g}{\partial T} = -6,5 \cdot 10^{-4} \text{ эв/град [53].}$$

$$3^* x = 95 \cdot 10^{-3} \text{ вт/(см}^2\text{град)} \text{ при } T \sim 100^\circ \text{ К [258].}$$

4* Высокотемпературная модификация; низкотемпературная модификация — ромбоэдрически искаженная структура типа NaCl; $a = 5,886 \text{ \AA}$, $\gamma = 88^\circ 35'$; переход происходит при 390—460°С [114].

5* Разлагается.

6* Непрямые переходы; прямые переходы дают значения 1,62 эв для SnSe₂ и 2,88 эв для SnS₂ [183].

$$7^* x = 0,018 \frac{\text{кВт}}{\text{см}^2\text{град}} \text{ [39].}$$

8* При 813°К — полиморфное превращение. При 898° К, 61 ат. % Se: SnSe и SnSe₂ образуют эвтектику [39].

9* Непрямой переход, $dE_g/dT = -4,3 \cdot 10^{-4} \text{ эв/град [39].}$

$$10^* \epsilon_0 = 1280; \epsilon_\infty = 45, \omega_L = 139 \text{ см}^{-1}; \omega_{\perp} = 26 \text{ см}^{-1} \text{ [254].}$$

11* В зависимости от концентрации примесей $m_n^* = 0,48 \div 0,78 m_0$ [203].

$$12^* m_{dn} = 0,22 m_0; m_{\sigma n} = 0,12 \div 0,18 m_0 \text{ [69]; } m_{\sigma n} = 0,16 m_0 \text{ [259]; } m_{dn} = 0,44; 0,32 m_0 \text{ [60].}$$

13* $\parallel c$ μ_p в несколько раз меньше.

14* μ_p сильно зависит от концентрации p [128], μ_1, μ_2 — подвижности легких и тяжелых дырок.

Соединения типа A^VB^V — A^VB^{VII}

Полупроводниковые соединения типа A^VB^V

Из соединений этого типа наиболее изучены сплавы Bi_xSb_{1-x}. При $x = 0,92$ [56]:

$$\mu_n = 700 \text{ см}^2/(\text{в.сек}) (\sim T^{-3/2}), \mu_n/\mu_p = 6, m_n/m_0 = 0,17.$$

— AsSb — полупроводник с $E_g = 1,6 \text{ эв}$ (300°K), $\mu_p = 200 \text{ см}^2/(\text{в.сек})$. Плавится при $T = 1080^\circ \text{ К}$ [242].

Полупроводниковые соединения типа A^VB^{VI}

Соединения этого типа используются при создании термоэлектрических устройств. Наиболее изучены Bi₂Se₃ и Bi₂Te₃ и их твердые растворы друг с другом, а также с Bi₂S₃, Sb₂S₃, Sb₂Se₃ и др.

Кристаллы Bi₂Se₃, Bi₂Te₃ кристаллизуются в ромбоэдрической структуре (D_{3d}^5), приводящей к сильной анизотропии их механических и электрических свойств.

Зонная структура — прямая; экстремумы зон расположены на плоскостях отражения зоны Бриллюэна. Вблизи экстремумов поверхности постоянной энергии в обеих зонах близки к эллипсоидам вращения. Дополнительные подзоны имеются как в зоне проводимости, так и в валентной зоне [169] (рис. 21.102).

В других соединениях рассматриваемого типа зонная структура может быть не прямой, как это имеет место, например, в Sb_2Te_3 и As_2Se_3 [197, 198]. Тип про-

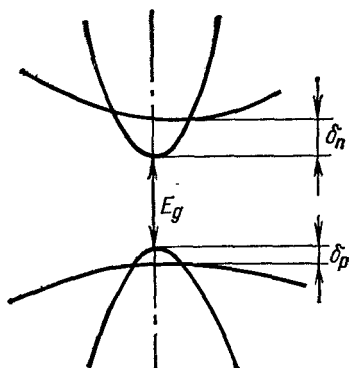


Рис. 21.102. Зонная структура Bi_2Te_3 и Bi_2Se_3 . (Для Bi_2Te_3 $\delta_n = 0,03$ эВ, $\delta_p = 0,02$ эВ [169].)

водимости в этих соединениях часто определяется их отклонением от стехиометрии.

Данные по удельной проводимости типичного для этой группы соединения Bi_2Te_3 представлены на рис. 21.103, 21.104.

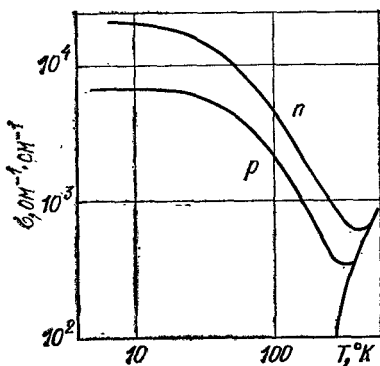


Рис. 21.103. Зависимость удельной проводимости Bi_2Te_3 от температуры (типичные образцы p - и n -типа) [117].

Полупроводниковые соединения типа AVBVII

SbI_3 обладает следующими свойствами: $E_g = 2,5$ эВ (300° К), кристаллическая структура гексагональная, C_{21} , $a = 7,466 \div 7,49$ Å, $c = 20,9$ Å [242].

Соединения типа $\text{AV}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{IV}}-\text{AV}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$

Полупроводниковые соединения типа $\text{AV}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{IV}}$. Из полупроводниковых соединений этого типа известно CrSi_2 , для которого $E_g = 1,3$ эВ, $\alpha = 87$ мкВ/град. Оно обладает проводимостью p -типа, подвижность очень мала [16].

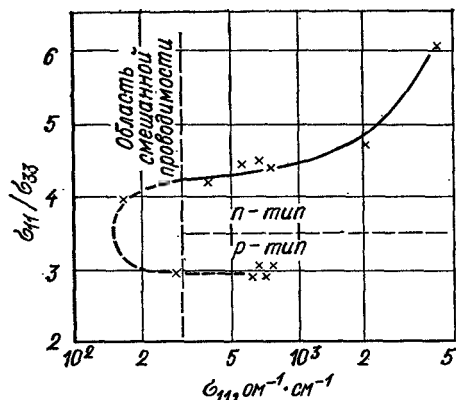


Рис. 21.104. Анизотропия проводимости Bi_2Te_3 [117]:

σ_{11} , σ_{33} — значения удельной проводимости в направлениях, параллельном и перпендикулярном базовой плоскости (001) соответственно.

Таблица 21.25

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $\text{AV}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	E_g , эВ	Литература
	Тип	a , c , Å			
CrO_3	Кубическая C_{2v}^{16}	$a = 5,743$ $b = 8,557$ $c = 4,789$	[242] [242] [242]	1,4	[242]
Cr_2O_3	Гексагональная D_{3d}^6	$a = 4,954$; 4,96 $c = 13,584$; 13,59	[242] [242]	1,59— 1,63	[242]
CrTe_2^*	—	—	—	0,17	[16]
MoS_2^{2*}	Гексагональная D_{6h}^4	$a = 3,15$ $c = 12,30$	[1] [1]	1,2	[10]
MoTe_2	—	—	—	1,023*	[90]
TeO_2	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$a = 4,79$ $c = 3,77$	[1] [1]	1,5	[10]

* $\mu_n = 12$ см²/(в·сек) [70].

** $\mu_p = 200 \div 300$ см²/(в·сек) [249].

** $dE_g/dT = -5,4 \cdot 10^{-4}$ эВ/град [90].

Электрофизические свойства соединений типа $A^V B^VI$

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	$\rho, \frac{\Omega}{\text{см}}$	Литература	$I_{\text{пл}}, \text{°K}$	Литература	$E_g, \text{эВ}$	Литература	$\frac{dE_g}{dT}, \frac{\text{эВ}}{\text{град}}$	Литература	Тип проводимости	Литература	$\frac{m_n}{m_0}$	Литература	$\frac{m_p}{m_0}$	Литература
	Тип	$a, b, c, \text{Å}$															
As_2S_3	Моноклинная C_{2h}^5	$a = 11,47$ $b = 9,57$ $c = 4,24$	[1] [1] [1]	3,43	[123]	598	[123]	2,5	[123]	-5,6	[10]	—	—	—	—	—	—
As_2Se_3	Моноклинная	—	[207]	4,75	[216]	633	[216]	1,8 1,6 1,9	[114] [123] [107]	—	—	—	—	—	—	—	—
As_2Te_3	Моноклинная C_s^3	$a = 14,4$ $b = 4,85$ $c = 9,92$	[1] [1] [1]	6,1	[123]	635	[116]	1,0 (300°K)	[123]	—	—	—	—	$m_d = 0,36m_0$	[15]	$m_d = 0,5m_0$	[15]
Sb_2S_3	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$a = 11,2$ $b = 11,28$ $c = 3,83$	[1] [1] [1]	4,64	[123]	819	[116]	1,72 1,62	[114] [12]	-5,7	[114]	n, p^*	[114]	—	—	—	—
Sb_2Se_3	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$a = 11,58$ $b = 11,68$ $c = 3,98$	[1] [1] [1]	5,81	[123]	885	[116]	1,2 (300°K)	[123]	-7	[114] [116]	p	[16]	—	—	—	—
Sb_2Te_3	Тригональная D_{3d}^5	$a = 4,25$ $c = 6,07$	[1] [1]	6,57 6,5	[114] [198]	895	[118]	0,3 (300°K) 0,19	[123] [48]	—	—	p	[114]	$m_d = 0,37m_0$	[15]	$m_d = 0,34m_0$	[15]
Bi_2O_3	Моноклинная C_{2h}^5	$a = 5,83$ $b = 8,14$ $c = 7,48$	[242] [242] [242]	8,76	[242]	1093	[242]	3,2	[242]	—	—	—	—	—	—	—	—
Bi_2S_3	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$a = 11,13$ $b = 11,27$ $c = 3,97$	[1] [1] [1]	6,73	[123]	1123	[116]	1,3 (300°K) 1,25 (300°K)	[116] [16]	—	—	n	[114]	1,25	[242]	—	—
BiSe	Ромбоэдрическая	$a = 5,85$ 3,846 $a = 79,0^\circ$	[123] [242]	7,98	[123]	880	[123]	0,4	[123]	—	—	—	—	—	—	—	—
Bi_2Se_3	Тригональная D_{3d}^5	$a = 9,84$ $a = 24,4^\circ$	[132]	7,398	[114]	979	[116]	0,35 0,41	[116] [168]	-2	[168]	n	[167]	$m_\perp = 0,22m_0$ $m_\parallel = 0,13m_0$ 0,3	[166] [114]	—	—

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	ρ , см ³	Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	E_g , эВ	Литература	$\frac{dE_g}{dT}$, 10 ⁻⁴ эВ/град	Литература	Тип проводимости	Литература	$\frac{m_n}{m_0}$	Литература	$\frac{m_p}{m_0}$	Литература
	Тип	a, b, c , Å															
Bi ₂ Te ₃	Тригональная D_{3d}^5	$a = 10,478$ $a = 24^\circ 9' 32''$	[117]	7,859	[117]	853	[116]	0,16 (300°K) 0,13 (300°K)	[45] [117]	-0,95	[45, 117]	ρ^{2*}	[114]	$m_d =$ $= 0,37m_0$ $m_d =$ $= 0,32m_0$	[117] [123]	$m_d =$ $= 0,51m_0$ $m_d =$ $= 0,24m_0$ $m_{d2} =$ $= 2,5m_0$ $m_{d2} =$ $= 0,9m_0$	[117] [123] [196] [182]
V ₂ O ₅	Ромбическая D_{2h}^{13}	$a = 11,519$ $b = 3,559$ $c = 4,371$	[242] [242] [242]	—	—	941	[63]	2,2 2,5	[65] [63]	—	—	—	—	—	—	—	—
α -Nb ₂ O ₅	Моноклинная	$a = 21,34$ $b = 3,816$ $c = 19,47$	[242] [242] [242]	—	—	—	—	1,65	[16]	—	—	n	[16]	—	—	—	—

* Зависит от содержания S.

** При легировании Te можно получить кристаллы n -типа [16].

Продолжение табл. 21.24

Соединение	μ_n , см ² / в·сек	Литература	μ_p , см ² / в·сек	Литература	κ , см·град	Литература	α , МКв/ град	Литература	ϵ_∞	Литература	ϵ_0	Литература	Примечания	Литература
As ₂ S ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	7,5	[184]	9,7	[184]	$\hbar\omega_I \simeq 0,030$ эВ	[184]
As ₂ Se ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	6,0	[184]	8,9	[184]	$\hbar\omega_I \simeq 0,041$ эВ	[184]
As ₂ Te ₃	170	[15]	80	[15]	0,025	[114]	230—260	[116]	—	—	—	—	—	—
Sb ₂ S ₃	15	[115]	45	[115]	—	—	—	—	—	—	—	—	$T_D = 310^\circ\text{K}$ (80°K) $\frac{dE_g}{dP} = -7 \cdot 10$ эВ/бар	[132] [210]

Соединение	$\mu_n, \frac{\text{см}^2}{\text{в.сек}}$	Литература	$\mu_p, \frac{\text{см}^2}{\text{в.сек}}$	Литература	$\kappa, \frac{\text{вт}}{\text{см} \cdot \text{град}}$	Литература	$\alpha, \frac{\text{мкв}}{\text{град}}$	Литература	ϵ_∞	Литература	ϵ_0	Литература	Примечания	Литература
Sb_2Se_3	75 15	[16] [114]	45	[16, 114]	—	—	$1,2 \cdot 10^3$	[114]	—	—	—	—	$T_D = 240^\circ\text{K} (80^\circ\text{K})$ $\frac{dE_g}{dP} =$ $= -14 \cdot 10^{-8} \text{ эв/бар}$	[132] [210]
Sb_2Te_3^*	—	—	280—360 400 2000 (4,2°K)	[114] [44] [83]	0,04	[114]	80 80—100	[116] [114]	—	—	—	—	$T_D = 160^\circ\text{K} (80^\circ\text{K})$	[132]
Bi_2O_3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18,2 (~2Mzu)	[242]	—	—
Bi_2S_3	200	[123]	—	—	0,0206	[114]	700	[114]	—	—	—	—	—	—
BiSe	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Bi_2Se_3	600—2000 ($\sim T^{-7/2}$) (130—300°K) 600	[114] [114] [16]	—	—	0,024	[147]	300	[16]	—	—	—	—	$T_D = 180^\circ\text{K} (80^\circ\text{K})$	[132]
Bi_2Te_3	1200 ($\sim T^{-1,7}$)	[13]	600 ($\sim T^{-2}$)	[13]	0,025 0,016 0,0175	[242] [147] [242]	170 (n-тип) 150 (p-тип) 50 (собств.)	[117] [117] [117]	85	[117]	360 ± 50	[192]	$T_D = 212^\circ\text{K}$ $T_D = 155,5^\circ\text{K}$ Расстояние между подзонами дырок 20 мэв	[123] [117] [182]
V_2O_5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$\alpha\text{-Nb}_2\text{O}_5$	22	[242]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Валентная зона расщеплена на две. Изоэнергетические поверхности первой зоны — 12 эллипсоидов, $m_{p1}^* = 0,034m_0$, $m_{p2}^* = 0,34m_0$, $m_{p3}^* = 0,54m_0$, $m_{d1}^* = 0,18m_0$. Для второй зоны $m_{d2}^* = 0,3 m_0$ [83]; интервал между зонами 150 мэв.

Полупроводниковые соединения типа $A^{VII}B^{III}$. Известно полупроводниковое соединение этого типа $MnAl_3$ с шириной запрещенной зоны $E_g = 0,45 \div 0,58$ эВ при 300°K, подвижность электронов более $200 \text{ см}^2/(\text{в} \cdot \text{сек})$, подвижность дырок $\mu_p \sim 200 \text{ см}^2/(\text{в} \cdot \text{сек})$ [242].

Полупроводниковые соединения типа $A^{VII}B^{IV}$. Известны полупроводники этого класса $ReSi_2$ с шириной запрещенной зоны $E_g = 0,13$ эВ [16] и $MnSi$ с кубической кристаллической структурой: $a = 4,557 \text{ \AA}$, группа T^4 , $E_g = 0,5 \div 0,6$ эВ, $\mu_p = 10 \div 40 \text{ см}^2/(\text{в} \cdot \text{сек})$, $\chi = 10^{-2} \text{ вт}/(\text{см} \cdot \text{град})$ [242].

Полупроводниковые соединения типа $A^{VII}B^{VI}$

Таблица 21.26

Электрофизические свойства халькогенидов и оксид марганца

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	E_g , эВ	μ_n , $\frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$	Литература
	Тип	$a, b, c, \text{ \AA}$				
MnO_2	Ромбическая D_{2h}^{16}	$a = 9,27$ $b = 2,866$ $c = 4,533$	[242] [242] [242]	$0,13 - 0,19$ (300°K)	1,2	[242]
$MnSe^*$	Кубическая O_h^5	$a = 5,45$	[216, 242]	0,68 2,5	—	[80] [242]

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	E_g , эВ	μ_n , $\frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$	Литература
	Тип	$a, b, c, \text{ \AA}$				
$MnSe_2$	Кубическая T_h^6	—	[242]	0,15	—	[242]
$MnTe^{**}$	Гексагональная D_{6h}^4	$a = 4,14$ $c = 6,71$	[216] [242]	0,28 1	— 1	[242] [106]
$MnTe_2^{**}$	—	—	—	0,48	—	[16]

* Антиферромагнетик. Температура Нееля $T_N = 247^\circ\text{K}$.

** Антиферромагнетик. Температура Нееля $T_N = 310^\circ\text{K}$.

** $a = 439 \text{ мкв/град}$. Температура начала кристаллизации 1154°K [46].

Соединения типа $A^{VIII}B^V - A^{VIII}B^{VI}$

Полупроводниковые соединения типа $A^{VIII}B^V$. Соединения этого типа изучены слабо. Зона проводимости $PtSb_2$ -8 эллипсоидов вращения, большие оси которых расположены в направлениях [111]. Валентная зона — 6 эллипсоидов вращения, расположенных вдоль осей [100] [41]. Энергия прямого перехода $E_d > 0,4$ эВ $E_g = 0,08$ эВ соответствует непрямому переходу [175].

Таблица 21.27.

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $A^{VIII}B^V$

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	E_g , эВ	Литература	$\frac{m_n}{m_0}$	Литература	$\frac{m_p}{m_0}$	Литература	μ_n , $\frac{\text{см}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$	Литература
	Тип	$a, b, c, \text{ \AA}$											
$CoSb_2$	Орторомбическая D_{2h}^{12}	$a = 3,21$ $b = 5,78$ $c = 6,42$	[1] [1] [1]	—	—	0,2	[16]	—	—	—	—	—	—
$CoSb_3$	Кубическая T_h^5	$a = 9,034$ 9,936	[242] [242]	1131	[249]	0,5	[16, 249]	—	—	—	—	300	[16]
$PtSb_2$	Кубическая T_h^6	$a = 6,43$	[1]	1503	[41]	0,08	[41]	$m_d = (0,42 \div 0,54)m_0$ $\frac{m_{ }}{m_{\perp}} = 1,4$	[41] [41]	$m_d = (0,57 \div 0,72)m_0$ $m_{ } = 0,168m_0$ $m_{\perp 1} = 0,098m_0$ $m_{\perp 2} = 0,06m_0$	[41] [175] [175] [175]	—	—

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа A^{VIII}B^{VI}

Соединение	Кристаллическая структура		Литература	$T_{пл}, ^\circ K$	Литература	$E_g, эв$	Литература	$\mu_n, \frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	$\alpha, \frac{мкв}{град}$	Литература
	Тип	$a, b, c, \text{\AA}$									
Fe ₂ O ₃	Ромбодричская	$a = 5,4271$	[242]	1500 1838	[242] [16]	1,6 2,2	[16] [242, 249]	—	—	—	—
FeS ₂	Кубическая T_h^6	$a = 5,405$	[242]	962	[249]	1,25	[16]	200	[16]	—	—
FeSe ₂	Ромбическая D_{2h}^{12}	$a = 3,58$ $b = 4,79$ $c = 5,72$	[1] [1] [1]	1183*	[16]	0,95	[16]	—	—	62	[16]
FeTe ₂	Ромбическая D_{2h}^{12}	$a = 3,85$ $b = 5,34$ $c = 6,26$	[1] [1] [1]	1015*	[16]	0,46	[16]	1	[51]	64	[16]
Fe ₂ Te ₃	—	—	—	—	—	0,34	[70]	11,5	[242]	—	—
NiO ^{2*}	Кубическая O_h^5	$a = 4,18$	[1]	3170	[42]	3,73*	[95]	—	—	—	—

* Приведены температуры начала кристаллизации, так как эти дихалькогениды плавятся с разложением.

** $\rho = 6,6 \text{ г/см}^3$, $\chi = 0,0024 \text{ см}^2/(\text{г} \cdot \text{град})$ [132], $\mu = 0,1 \text{ см}^2/(\text{г} \cdot \text{сек})$ [95], $\mu = 0,2 \text{ см}^2/(\text{г} \cdot \text{сек})$ [25], $\epsilon_\infty = 4,75$, $\epsilon_0 = 11,9$ [29]. Полупроводник; может обладать магнитным порядком.** Соответствует не ширине запрещенной зоны, а электронному переходу $3d \rightarrow 4s$; ширина запрещенной зоны значительно больше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Landolt-Börnstein. Zählenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik, Technik. — «J. Springer», 1955, Bd 1, S. 4.
- Wilkoff R. W. C. Crystall Structures. N. Y., Interscience Publ., 1953.
- Харцеев В. Е. «Физика твердого тела», 1962, т. 4, с. 433.
- Albers W. «Phys. Chem. Sol.», 1960, v. 15, p. 306.
- Maesen F., Witmer C. Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1211.
- Wohler L., Shliephake O. «Z. anorgan. und allgem. Chem.», 1926, Bd 151, S. 1.
- Ефимов Б. А. «Физика твердого тела», 1963, т. 7, с. 2523.
- Atanable S. «J. Phys. Soc. Japan», 1960, v. 15, p. 989.
- Физический энциклопедический словарь. М., «Советская энциклопедия», 1960.
- Бьюб Р. Фотопроводимость твердых тел. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
- Смит Р. Полупроводники. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
- Ybuki I. «J. Phys. Soc. Japan», 1955, v. 10, p. 549.
- Drabble G. «Proc. Phys. Soc.», 1956, v. B69, p. 1101; 1958, v. B72, p. 380.
- Nayar P. S., Verma J. K. D., Nag B. O. «J. Appl. Phys.», 1968, v. 39, p. 4465.
- Rodot M. «Phys. St. Sol.», 1963, v. 3, p. 10.
- Угай Я. А. Введение в химию полупроводников. М., «Высшая школа», 1965.
- Benedict B. P., Look D. C. «Phys. Rev. B», 1970, v. 2, p. 4949.
- Кот М. В., Крещу Л. В. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1964, т. 281, с. 295.
- Novakov T., Prins R. «Sol. State Comm.», 1971, v. 9, p. 1975.
- Stevenson M. J. Intern. Conf. Semicond. Phys. Prague, 1960, p. 1083.
- Hopfield J. J., Thomas D. G. «Phys. Rev.», 1961, v. 122, p. 35.
- Dimmock J. O., Wheeler R. J. «J. Appl. Phys.», 1961, v. 32, p. 2271.
- Noguét P. C. e. a. «J. Phys.», 1965, v. 26, p. 317.
- Gerstein B. C. e. a. «J. Chem. Phys.», 1967, v. 47, p. 2109.
- Богомолов В. И. и др. «Физика твердого тела», 1967, т. 9, с. 3175.
- Prener I. Woodbury. Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1231.
- Хилсум К., Роуз-Инс А. Полупроводники типа AIII—BV. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1963.

28. Мосс Т. С. Оптические свойства полупроводников. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
29. Marshall R. Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1101.
30. Fisher A. S. "Helv. Phys. acta", 1963, v. 36, p. 317.
31. Грамацкий В. И., Мушинский В. П. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1964, т. 28, с. 1077.
32. Ахундов Г. А. и др. Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1277.
33. Veric C. New Develop Semiconductors, Leyden, 1973, p. 514.
34. Мирзабаев М. и др. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1964, т. 28, с. 1300.
35. Dennis L. M., Hulse R. E. "J. Amer. Chem. Soc.", 1930, v. 52, p. 3553.
36. Жузе В. П. Полупроводниковые материалы. Вып. 17. Изд-во Ленингр. дома науч.-тех. пропаганды. Л., 1957.
37. Парфеньев Р. В. и др. «Физика твердого тела», 1962, т. 4, с. 3596.
38. Juldner J. e. a. Proc. XI Conf. Phys. Semicond., Warshawa, 1972, p. 351.
39. Хворостенко А. С. Селениды металлов: меди, таллия, олова, свинца. Сер.: Физ. и хим. свойства твердого тела. М., ВНИИКИ, 1971.
40. Rodot M. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1965, v. 260, p. 1908.
41. Emtage P. R. "Phys. Rev.", 1965, v. 138, p. 246.
42. Botling J. F. "J. Chem. Phys.", 1960, v. 33, p. 305.
43. Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам. Под ред. Н. Н. Горюнова. М., «Энергия», 1972.
44. Von Liebe L. "Ann. Physik", 1965, Bd 7, N 15, S. 179.
45. Sälzer O., Nieke H. "Ann. Physik", 1965, Bd 7, N 15, S. 192.
46. Onuki M. "J. Phys. Soc. Japan", 1965, v. 20, p. 171.
47. Kot M. B. и др. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 1242.
48. Väsche R. "Ann. Physik", 1965, Bd 7, N 15, S. 106.
49. Ломакина Г. А. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 600.
50. Komiya H. "Phys. Rev.", 1964, v. 133, p. A1679.
51. Suchet J. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1964, v. 259, p. 3219.
52. Rosenman M. J. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1964, v. 259, p. 2621.
53. Vennik J. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1965, v. 260, p. 496.
54. Hacke J. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 2484.
55. Redin A. D. "Phys. Rev.", 1958, v. 109, p. 1916.
56. Rodot M. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1964, v. 258, p. 5414.
57. Baer W. S. "Phys. Rev.", 1964, v. 135, p. 1388.
58. Koper E., Robenau A. "Z. Naturforsch.", 1958, Bd 13, S. 531.
59. Dunstädter H. "Z. Physik", 1954, Bd 137, S. 383.
60. Вольфштейн В. М., Фистуль В. И. В сб.: Электроника и ее применение. Т. 4. Сер. Итоги науки и техники. М., ВИНТИ АН СССР, 1973.
61. Коммер А. Х. Фотоэмиссионные материалы. Пер. с англ. М., «Мир», 1972.
62. Физические свойства халькогенидов редкоземельных элементов. Под ред. В. П. Жузе. Л., «Наука», 1973.
63. Allersma T. e. a. "J. Chem. Phys.", 1967, v. 46, p. 154.
64. Reid F. "J. Electrochem. Soc.", 1964, v. 111, p. 943.
65. Мокеров В. Г., Раков А. В. «Физика твердого тела», 1969, т. 11, с. 197.
66. Park V. S. "Phys. Rev.", 1966, v. 143, p. 512.
67. Lott S. A., Synch D. W. "Phys. Rev.", 1966, v. 141, p. 681.
68. Camassel J. e. a. "Sol. State Comm.", 1973, v. 13, p. 63.
69. Marby J. A. "Phys. Rev.", 1965, v. 140, p. 304.
70. Aramu Z., Mancu P. Rend. Semin. fac. Sci. Univ. Gagliari, 1963, v. 33, N 3—4, p. 26.
71. Baar N. "Z. anorg. Chem.", 1911, Bd 70, S. 372.
72. Ogorbec L. "Crocc. Chem. Acta", 1965, v. 37, p. 49.
73. Moss T. S., Ellis B. Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 311.
74. Brüesch P. e. a. "Sol. State Comm.", 1973, v. 13, p. 9.
75. Whitaker J. "Sol. St. Electronics", 1965, v. 8, p. 649.
76. Угай Я. А., Зюбина Т. А. «Неорганические материалы», 1965, т. 1, с. 790.
77. Zdanowich W., Wojkowski A. "Phys. St. Sol.", 1965, v. 8, p. 569.
78. Douglas R. "J. Phys. Chem. Sol.", 1965, v. 21, p. 329.
79. Richard D. "J. Phys. Chem. Sol.", 1965, v. 26, p. 439.
80. Маковецкий Г. И., Сырота И. Н. «Докл. АН БССР», 1965, т. 9, с. 15.
81. Abraham A. «Чехосл. физ. журн.», 1965, т. B15, с. 138.
82. Tamura H. e. a. "Sol. State Comm.", 1973, v. 12, p. 11.
83. Von Middendorff A. e. a. "Sol. State Comm.", 1973, v. 13, p. 443.
84. Цидильковский И. М. Электроны и дырки в полупроводниках. М., «Наука», 1972.
85. Орлова Н. И., Шишкин П. Т. «Изв. АН АзССР. Сер. физ.-мат.», 1964, № 4, с. 53.
86. Winker H. "Helv. Phys. Acta", 1955, v. 28, p. 633.
87. Myers H. P. "Sol. State Comm.", 1964, v. 2, p. 321.
88. Сорокин Г. П. «Изв. вузов. Физика», 1965, № 4, с. 140.
89. Голубков А. В. и др. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 2430.
90. Sopotit A. "J. Phys.", 1965, v. 26, p. 175.
91. Гертович Т. С. и др. «Укр. фіз. журн.», 1973, т. 18, с. 1523.
92. Verolini C. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 1791.
93. Милославский В. К. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 1550.
94. Сорокин Г. П. и др. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 2244.
95. Ксендзов Я. М., Драбкин И. А. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 1884.
96. Лашкарёв Г. В. «Укр. фіз. журн.», 1965, т. 10, с. 520.
97. Лашкарёв Г. В. и др. «Укр. фіз. журн.», 1965, т. 10, с. 516.
98. Алиев С. А. и др. «Физика и техника полупроводников», 1973, т. 7, с. 1086.
99. Aulich E., Brebner J. L., Mooser E. "Phys. St. Sol.", 1969, v. 31, p. 129.
100. Угай Я. А. и др. «Докл. АН СССР», 1965, т. 163, с. 663.
101. Коломиец Б. Т. и др. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 2534.
102. Davlen V. R. M. "Phys. Rev.", 1966, v. 143, p. 666.
103. Komiya H. e. a. "Phys. Rev.", 1964, v. A133, p. 679.
104. Вердиева Н. А. и др. «Изв. АН АзССР», 1973, № 3, с. 85.
105. Leotin J. e. a. "Sol. State Comm.", 1974, v. 15, p. 693.
106. Wassher J. D. Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1269.
107. Коломиец Б. Т. и др. Ibid., p. 1283.
108. Blik L. M., Landwehr G. "Phys. St. Sol.", 1969, v. 33, p. K67.

109. Кэй Дж., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1962.
110. Masumi T. "Phys. St. Sol.", 1965, v. 11, p. 163.
111. Zdanovich W., Wojkowski A. "Phys. St. Sol.", 1966, v. 16, p. K129.
112. Krevs V. E. a. a. "Phys. St. Sol. (a)", 1974, v. 65, p. K43.
113. Адирович Э. И., Гольдштейн Л. М. «Физика твердого тела», 1966, т. 8, с. 2467.
114. Абрикосов Н. Х. и др. Полупроводниковые соединения, их получение и свойства. М., «Наука», 1967.
115. Reinher A. General Survey of the Semiconductor field. National Bureau of Standards. Technical Note. 1962, p. 153.
116. Полупроводники. Под ред. Н. Б. Хенней. Пер. с англ. и нем. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
117. Материалы, используемые в полупроводниковых приборах. Под ред. К. Хогарта. Пер. с англ. М., «Мир», 1968.
118. "Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials". Purdue Univ., 1967.
119. Kazuo A., Heihachi M., Tetur T. "Japan J. Appl. Phys.", 1971, v. 10, p. 1107.
120. Grosse P. "Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften". Bd. 48. Springer Tracts in Modern Physics. Berlin, 1969.
121. Горюнова Н. А. Сложные алмазоподобные полупроводники. М., «Советское радио», 1968.
122. Wagrur R. J., Ewald A. K. "J. Phys. Chem. Sol.", 1971, v. 32, p. 697.
123. Родо М. Полупроводниковые материалы. Пер. с франц. М., «Металлургия», 1971.
124. Добролеж С. А. и др. Карбид кремния. Киев, Гос. изд-во тех. лит. УССР, 1963.
125. Равич Ю. И. и др. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца. М., «Наука», 1968.
126. Коломиец Н. В., Лев Е. Я., Сысоева Л. М. «Физика твердого тела», 1963, т. 5, с. 2871.
127. Albers W. e. a. "J. Appl. Phys., Suppl.", 1961, v. 32, p. 2220.
128. Kafals J. A., Brebrick R. F., Strauss A. J. "Appl. Phys. Lett.", 1963, v. 4, p. 93.
129. Соболев В. Б. «Физика твердого тела», 1970, т. 12, с. 2687.
130. Cuhn M. L., Au-Yang M. Y. "Phys. Rev.", 1969, v. 178, p. 1358.
131. Winkler H. "Helv. Phys. acta", 1955, v. 28, p. 663.
132. Aigrain P., Balkansky M. Table de constante des Semiconducteur's. Pergamon Press, Paris, 1961.
133. Turner W. J., Fisher A. S., Reese W. E. "J. Appl. Phys.", 1961, suppl. to v. 32, p. 2241.
134. Горюнова Н. А. и др. «Физика твердого тела», 1969, т. 11, с. 280.
135. Turner W. J. "Phys. Rev.", 1961, v. 121, p. 759.
136. Goncharenko G. I., Sheochenko V. Yu. "Phys. St. Sol.", 1970, v. 41, p. K117.
137. Aubin M., Brizzard R., Messa J. P. "Canad. J. Phys.", 1970, v. 48, p. 2215.
138. Физика и химия соединений типа ABV_6 . Пер. с англ. Под ред. А. С. Медведева. М., «Мир», 1970.
139. Hamilton P. H. "Semicond. Proc. and Sol. St. Technol.", 1964, v. 7, N 6, p. 15.
140. Betts D. D. "Canad. J. Phys.", 1961, v. 39, p. 223.
141. Robic R. A., Edwards J. L. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 2659.
142. Rode D. L. "Phys. Rev.", 1970, v. 2B, p. 4036.
143. Милославский В. К., Шкляреаский О. Н. «Физика и техника полупроводников», 1971, т. 5, с. 926.
144. Watanabe H., Wada H., Takahashi T. "Japan J. Appl. Phys.", 1964, v. 3, p. 617.
145. Полупроводники с узкой запрещенной зоной и их применение. М., «Мир», 1969.
146. Sobolev V. V., Surbu N. N. "Phys. St. Sol. (B)", 1973, v. 51, p. 863.
147. Драбл Д., Гольдсмит Г. Теплопроводность полупроводников. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
148. Balkansky M., Zellag E. A. M., Longen D. "J. Phys. Chem.", 1966, v. 27, p. 299.
149. Segall B., Lorenz M., Woodbury H. "Phys. Rev.", 1963, v. 129, p. 2471.
150. Медведева З. С. Халькогениды элементов III Б подгруппы периодической системы. М., «Наука», 1968.
151. Tagiev B. F. e. a. "Phys. St. Sol. (a)", 1970, v. 3, p. K119.
152. Chien T. e. a. "J. Phys. Soc. Japan", 1970, v. 29, p. 150.
153. Aven M. "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1204.
154. Park Y. S., Hemenger P. M., Chung C. H. "Appl. Phys. Lett.", 1971, v. 18, p. 45.
155. Reignold D. G., Litton C. W., Collins T. "Phys. Rev.", 1965, v. 146, p. 1726.
156. Seiler D. G., Galazka R. R., Becher W. M. "Phys. Rev.", 1971, v. B3, p. 4274.
157. Баширов Р. И., Гаджиев Р. М. «Физика твердого тела», 1970, т. 4, с. 1936.
158. Поморцев Р. В. и др. В кн.: Труды IX Междунар. конф. по физике полупроводников. Т. 2. М., «Наука», 1969, с. 763.
159. Dietz R. F., Hopfield J. J., Thomas D. G. "J. Appl. Phys.", 1961, v. 32, p. 2282.
160. Dickey D., Mavrodes J. "Sol. State Comm.", 1964, v. 2, p. 213.
161. Fisher P., Fan H. "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1959, v. 4, p. 409.
162. Рывкин С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М., Физматгиз, 1963.
163. Marshall G. "J. Phys. (France)", 1970, v. 31, p. 681.
164. Fingold L. "Phys. Rev. Lett.", 1964, v. 13, p. 233.
165. Yabumoto T. "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 13, p. 559.
166. Köhler H., Landwehr G. "Phys. St. Sol.", 1971, v. 45, p. K109.
167. Caywood L. P., Miller G. R. "Phys. Rev. B", 1970, v. 2, p. 3209.
168. Black J. "Phys. Chem. Sol.", 1957, v. 2, p. 240.
169. Смирнов И. А., Шадричев Е. В., Кутасов В. А. «Физика твердого тела», 1969, т. 11, с. 3311.
170. Маделунг О. Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп. Пер. с англ. М., «Мир», 1967.
171. Long D. Energy Bands in Semiconductors. Interscience Publishers. A Division of John Wiley and Sons. New York—London—Sydney, 1968.
172. Minden H. T. "Appl. Phys. Lett.", 1970, v. 17, p. 358.
173. Kessler F. R. "Phys. St. Sol.", 1964, v. 6, p. 3.
174. Sambros A. P. e. a. "Phys. St. Sol.", 1973, v. 57, p. 793.
175. Damon D. H., Miller R. C., Emrtage P. R. "Phys. Rev. B", 1972, v. 5, p. 2175.
176. Mears A., Stradling R. A. "J. Phys. C", 1971, v. 4, p. 122.
177. Tzidilkovsky I. M., Akseirod M. M., Uritsky S. I. "Phys. St. Sol.", 1965, v. 12, p. 667.
178. Steigmeier E. F., Kudman I. "Phys. Rev.", 1966, v. 141, p. 767.

179. Kusel R., Weichmann F. L. "Canad. J. Phys.", 1970, v. 48, p. 2643.
180. Dismukes D. "J. Phys. Chem. Sol.", 1971, v. 32, p. 1689.
181. Цуркан А. Е., Максимова О. Г., Верлан В. И. В сб.: Сложные полупроводники и их физические свойства. Кишинев, «Штиница», 1971, с. 128.
182. Schröder B. e. a. "Phys. St. Sol. (B)", 1973, v. 59, p. 561.
183. Domingo G., Itoga R. S., Kanneur C. R. "Phys. Rev.", 1966, v. 143, p. 536.
184. Марков Ю. Ф. Исследование оптических свойств полупроводниковых соединений в далекой инфракрасной области спектра. Кандидатская диссертация. ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Л., 1972.
185. Ehrenreich H. "Phys. Rev.", 1960, v. 120, p. 1951.
186. Панфилов В. В., Субботин С. Л., Вережагин Л. Ф. «Докл. АН СССР», 1971, т. 96, с. 559.
187. Drexler J., Heyman P. M. "Phys. Rev. B", 1971, v. 3, p. 2689.
188. Heller M. W., Babiskin J., Radoff P. L. "Phys. Rev.", 1971, v. A36, p. 363.
189. Чайдс У. Физические постоянные. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1961.
190. Полупроводники в науке и технике. Под ред. А. Ф. Иоффе. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1957.
191. Becher W., Fuhs W., Stuke J. "Phys. St. Sol.", 1971, v. 44, p. 147.
192. Unkelbach K. H. e. a. "Phys. St. Sol. (B)", 1973, v. 60, p. K41.
193. Slack G. A. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 143, p. 666.
194. Мороз А. И., Одарич В. А. «Укр. физ. журн.», 1971, т. 16, с. 1501.
195. Сидякин В. Г., Руденко В. Н. «Изв. АН СССР. Сер. неорган. матер.», 1970, т. 6, с. 1861.
196. Сологуб В. В., Голецкая А. Д., Парфеньев В. В. «Физика твердого тела», 1972, т. 14, с. 915.
197. Коломиец Б. Т. и др. «Физика и техника полупроводников», 1971, т. 5, с. 2301.
198. Шутов С. О., Соболев В. В., Смешливый Л. И. В сб.: Полупроводниковые соединения и их твердые растворы. Ред.-изд. отд. АН МССР, Кишинев, 1970, с. 155.
199. Whitsett C. R., Nelson D. A. "Phys. Rev. B", 1972, v. 5, p. 3125.
200. Overhof H. "Phys. St. Sol.", 1971, v. 43, p. 221.
201. Miller K. A., Schneider J. "Phys. Lett.", 1963, v. 4, p. 288.
202. Look D. C., Moore D. L. "Phys. Rev. B", 1972, v. 5, p. 3406.
203. Lewis J. E. "Phys. St. Sol. (B)", 1973, v. 59, p. 367.
204. Onton A. "Phys. Rev. B", 1971, v. 4, p. 4449.
205. Brebrick R. F., Strauss A. J. "Phys. Rev.", 1963, v. 131, p. 104.
206. Bis R. F., Dixon J. R. "Phys. Rev. B", 1970, v. 2, p. 1004.
207. Потемкин А. Я. Полупроводниковые материалы. М., Изд-во Моск. авиац. ин-та, 1968.
208. Nilsson N. G. "Phys. St. Sol. (A)", 1973, v. 19, p. K75.
209. Grant F. A. "Rev. Mod. Phys.", 1959, v. 31, p. 646.
210. Мейлиск А. И., Кирс Я. Я. «Физика и техника полупроводников», 1969, т. 3, с. 11.
211. Frederikse H. P. R. "J. Appl. Phys.", 1961, Suppl. to v. 32, p. 2211.
212. Остин И. Р., Мотт Н. Физики о физике. Пер. с англ. М., «Знание», 1972.
213. Пол В. В. кн.: Труды IX междунар. конф. по физике полупроводников. Т. 1. М., «Наука», 1968, с. 17.
214. Кесаманлы Ф. П. «Физика и техника полупроводников», 1974, т. 8, с. 225.
215. Chie T. e. a. "Japan J. Appl. Phys.", 1971, v. 10, p. 1698.
216. Справочник химика. М., «Химия», 1964.
217. Shaver P. J., Blair J. "Phys. Rev.", 1966, v. 141, p. 649.
218. Langer D. Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 241.
219. Kahan A., Lipson H. G., Loewenstein E. V. Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1067.
220. Mitra S. S., Marshall R. Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1085.
221. Киреев П. С. Физика полупроводников. М., «Высшая школа», 1969.
222. Блатт Ф. Физика электронной проводимости в твердых телах. Пер. с англ. М., «Мир», 1971.
223. Блатт Ф. Теория подвижности электронов в твердых телах. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1963.
224. Данлэп У. Введение в физику полупроводников. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
225. Фистуль В. И. Сильно легированные полупроводники. М., «Наука», 1967.
226. Prince M. B. "Phys. Rev.", 1954, v. 93, 1204.
227. Голикова О. А., Мойжес Г. Я., Стильбанс Л. С. «Физика твердого тела», 1961, т. 3, с. 3105.
228. Brebrick R. F., Scanlon W. W. "Phys. Rev.", 1954, v. 99, p. 598.
229. Stradling R. "Sol. State Comm.", 1968, v. 6, p. 665.
230. Cardona M. Phys. III—V Compounds. Acad. Press, 1966, v. 3 p. 125.
231. Stradling R. Electronic Components, 1135—1142, October 1958.
232. Walton A., Mishra U. "Proc. Phys. Soc.", 1967, v. 90, p. 1111.
233. Stradling R. "Phys. Lett.", 1966, v. 20, p. 217.
234. Prince M. B. "Phys. Rev.", 1953, v. 92, p. 681.
235. Кот М. В., Прилепов В. Д., Цуркан А. Е. В сб.: Полупроводниковые соединения и их твердые растворы. Ред.-изд. отд. АН МССР, Кишинев, 1970, с. 3.
236. Машковский М. В. и др. «Зарубежная электронная техника», Вып. 12. 1974, с. 3. Произв.-изд. отд. ЦНИИ «Электроника».
237. Kalashnikov S. G. "J. Phys. Chem. Sol.", 1959, v. 8, p. 52.
238. Ewald A. W., Tuttle O. N. Ibid, p. 523.
239. Иванов-Омский В. И. и др. «Физика и техника полупроводников», 1970, т. 4, с. 264.
240. Гельмонт Б. Л. и др. «Физика и техника полупроводников», 1971, т. 5, с. 266.
241. Nasledov D. N., Shevchenko V. Ya. "Phys. St. Sol. (a)", 1973, v. 15, p. 9.
242. Кристаллохимические, физико-химические и физические свойства полупроводниковых веществ. М., Стандартгиз, 1973.
243. Никитин Е. Н., Базанов В. Г., Тарасов В. И. «Физика твердого тела», 1961, т. 3, с. 3645.
244. Blunt R. F., Frederikse H. P. R., Hosler W. R. "Phys. Rev.", 1955, v. 100, p. 663.
245. Lipson H. C., Kahan A. "Phys. Rev.", 1964, v. 133, p. A800.
246. Redin R. D., Morric R. G., Danielson G. C. "Phys. Rev.", 1958, v. 109, p. 1916.
247. Keating P., Lynch D. W., Danielson G. C. "J. Phys. Chem. Sol.", 1963, v. 20, p. 122.
248. Физико-химия твердого тела. Сборник. Под ред. Б. Сталинского. М., «Химия», 1972.
249. Соминский М. С. Полупроводники. Л., «Наука», 1967.
250. Alper T., Sanders G. A. "J. Phys. Chem. Sol.", 1967, v. 28, p. 1637.

251. Long D., Shmit J. L. «Semicond. Semimetals», 1970, v. 5, p. 175.
252. Baars J., Jorger F. «Sol. State Comm.», 1972, v. 10, p. 875.
253. Smith J. L., Helzer E. L. «J. Appl. Phys.», 1969, v. 40, p. 4865.
254. Burstein E., Pinczuk A., Wallis R. F. Proceedings of the conference on physics of semimetals and narrow gap semiconductors. — «J. Phys. Chem. Sol.», 1971, v. 32, suppl. N 1, p. 251.
255. Ih C. S., Langenberg O. N. Proceedings of the conference on physics of semimetals and narrow gap semiconductors. — «J. Phys. Chem. Sol.», 1971, v. 32, suppl. N 1, p. 73.
256. Горбачев В. В. и др. «Физика и техника полупроводников», 1973, т. 7, с. 844.
257. Сысоева Л. М. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 2223.
258. Lewis J. E., Rodot H., Haen P. «Phys. St. Sol.», 1968, v. 29, p. 743.
259. Wright. «Proc. Brit. Ceram. Soc.», 1968, v. 10, p. 103.
260. Исмаилов Р. И., Гусейнова Э. С., Акундов Г. А. «Физика твердого тела», 1963, т. 5, с. 3620.
261. Gerstein B. C., Chung P. L., Danielson G. C. «J. Phys. Chem. Sol.», 1966, v. 27, p. 1161.
262. Jelinek F. J., Shikell W. D., Gerstein B. C. «J. Phys. Chem. Sol.», 1967, v. 28, p. 267.
263. Коцюмаха П. А. и др. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1964, т. 28, с. 1329.
264. Dexter D. S. «J. Phys. Chem. Sol.», 1959, v. 8, p. 473.
265. Андроник И. К., Кот М. В. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1964, т. 28, с. 1028.
266. Соболев В. В. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1964, т. 28, с. 1090.
267. Кот М. В., Мшенский В. А. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1964, т. 28, с. 1025.
268. Иванов-Омский В. И. и др. «Докл. АН СССР» 1965, т. 162, с. 1269.
269. Dexter D. S. «J. Phys. Chem. Sol.», 1959, v. 8, p. 473.
270. Haan A. «Metall. V. Erz.», 1914, v. 10, p. 831.
271. Asanable S., Kazaki A. O. «Proc. Phys. Soc.», 1959, v. 73A, p. 824.
272. Syden H. «Phys. Rev.», 1964, v. 135, p. 514.
273. Copper J. «J. Phys. Chem. Sol.», 1964, v. 25, p. 1277.
274. Palik E. «Phys. Rev.», 1964, v. 135, p. 763.
275. Sagar A., Rubenstein M. «Phys. Rev.», 1966, v. 43, p. 55.
276. Tippins H. «Phys. Rev.», 1965, v. 140, p. 316.
277. Prosser V. «Чехосл. физ. журн.», 1965, т. B15, с. 128.
278. Dziuba Z., Zakrjewski T. «Phys. St. Sol.», 1965, v. 7, p. 1019.
279. Иванов-Омский В. И. и др. «Phys. St. Sol.», 1965, v. 8, p. 613.
280. Adams S. «Sol. State Comm.», 1964, v. 2, p. 387.
281. Park J. S., Chan F. S. «J. Appl. Phys.», 1965, v. 36, p. 800.
282. Maesen F. D. Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1211.
283. Eavesetal L. «J. Phys. G», 1971, v. 4, p. 142.
284. Ефимова Б. А. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 2524.
285. Mizuka N., Tanaka L. «Phys. St. Sol.», 1970, v. 42, p. 257.
286. Sukioka K., Tamura H. «Phys. Lett.», 1972, v. A37, p. 243.
287. Kanimura H., Nakado H. «J. Phys. Sol. Japan», 1966, v. 21, p. 27.

ГЛАВА 22

ПОТЕНЦИАЛЫ ИОНИЗАЦИИ И ЭНЕРГИИ ДИССОЦИАЦИИ

22.1. ПОТЕНЦИАЛЫ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ

Потенциалом ионизации называется энергия, необходимая для отрыва электрона от атома или иона.

В табл. 22.1 приведены последовательные потенциалы ионизации атомов и ионов в электронвольтах [1, 2]: U_1 — энергия, необходимая для отрыва электрона от

нейтрального невозбужденного атома; U_2 — энергия, необходимая для отделения электрона от однозарядного (положительного) невозбужденного иона, и т. д. Таблица составлена на основании работ [1, 2], причем предпочтение отдавалось значениям, для которых указана экспериментальная погрешность.

Таблица 22.1

ПОТЕНЦИАЛЫ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ

Атомный номер	Химический символ	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8	U_9	U_{10}	U_{11}
1	H	13,595										
2	He	24,580	54,403									
3	Li	5,390	75,619	122,42								
4	Be	9,320	18,206	153,85	217,66							
5	B	8,296	25,149	37,92	259,298							
6	C	11,264	24,376	47,864	64,476	340,13						
7	N	14,54	29,605	47,426	77,45	391,986	489,84					
8	O	13,614	35,146	54,934	77,894	113,873	551,925	666,83				
9	F	17,418	34,98	62,646	87,23	114,214	138,08	739,114	871,12			
10	Ne	21,559	41,07	63,5±0,1	97,16	126,4	157,117	185,139	239,1±0,1	935,8±0,3	1101,8	
11	Na	5,138	47,29	71,8±0,1	98,88	138,6	172,36	207,2±0,1	264,2±0,1	1195,4±0,3	1464,7±0,3	1646,4
12	Mg	7,644	15,03	78,2±0,1	109,29	141,23	186,8±0,1	225,31	265,957	328,0±0,1	367,2±0,1	1761,23
13	Al	5,984	18,823	28,44	119,96	153,77	190,42	241,8±0,1	285,13	330,1	398,6±0,1	441,9

Атомный номер	Химический символ	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8	U_9	U_{10}	U_{11}
14	Si	8,149	16,34	33,46	45,13	166,73	205,11	246,41	304,0±0,1	351,83	401,3	476,0
15	P	10,55	19,65	30,156	51,354	65,007	220,414	263,31	309,3±0,1	372,8±0,2	425,46	479,4
16	S	10,357	23,4	34,8	47,29	72,5±0,1	88,0±0,1	280,99	328,4±0,1	378,95	448,5±0,2	506,4
17	Cl	13,01	23,80	39,9	53,3	67,8±0,2	96,6±0,3	114,2±0,1	348,5	400,3±0,1	455,3	531,4
18	Ar	15,755	27,62	40,90	59,79	75,0±0,1	91,3±0,3	123,9±0,4	143,4±0,1	422,6±0,2	479,0±0,2	539,5
19	K	4,339	31,81	45,9	61,1	82,6±0,4	99,4±0,4	117,9±0,4	154,3±0,6	176,0±0,1	503,8±0,3	566,2
20	Ca	6,111	11,87	51,21	67,3	84,39	109,1	127,9±0,5	143,3±0,4	187,9±0,7	211,3±0,1	592,5
21	Sc	6,56	12,89	24,75	73,9	91,8	111,1	139±1	159,2±0,5	180,2±0,5	224,9±0,8	249,76
22	Ti	6,83	13,57	28,14	43,24	99,8	119	141±1	172±1	193,1±0,5	216,9±0,6	264,5
23	V	6,74	14,65	29,31	48	65,2	128,9	151	173,7	206±2	230,2±0,6	256,3
24	Cr	6,764	16,49	30,95	49,6	73,2	90,6	161,1	185	209,6	246±2	—
25	Mn	7,432	15,64	33,69	52	76,1	100±1	119,24	196,4	221±1	249±1	—
26	Fe	7,896	16,18	30,64	57,1	78	103±1	130±3	151,1	234,4±0,5	232±1	290,3
27	Co	7,86	17,05	33,49	53	83,5	106	133±1	163±5	185,9±0,1	276,9±0,6	305
28	Ni	7,633	18,15	36,16	56	78	110	136	168±2	200±6	224±1	318
29	Cu	7,724	20,29	36,83	58,9	82	106	140	169	206±4	241±8	—
30	Zn	9,391	17,96	39,70	62	86	112	142	177	212	247±6	—
31	Ga	6,00	20,51	30,7	64,2	90	118	144	174	218	255	—
32	Ge	7,88	15,93	34,21	45,7	93,4	113	148	177	212	262	—
33	As	9,81	18,7±0,1	28,3	50,1	62,9±0,1	127,5	150	182	218	274	—
34	Se	9,7	21,5	32,0	42,9	68,3±0,2	82,1±0,2	155	187	223	260	—
35	Br	11,84	21,6	35,9	47,3	59,7±0,1	88,6±0,2	103,0±0,4	193	228	266	—
36	Kr	13,996	24,56	36,9	52,5	64,7	78,5±0,1	111,0±0,4	126±0,1	234	270	—
37	Rb	4,176	27,56	39,3	52,6	71	84,4	99,2±0,1	136±1	150±2	277	—
38	Sr	5,692	11,02±	43,6	57,1	71,6	90,8	106	122,3±0,1	162±1	177±2	324
39	Y	6,38	12,23	20,5	61,8	77,0	93,0	116	129	146,2±0,2	191±1	—
40	Zr	6,835	12,92	24,11	33,97	82,3	99,4	116	139	154	173,0±0,2	—
41	Nb	6,88	13,9	28,1	38,3	49,5	110,4	124	141	165	186	—
42	Mo	7,131	15,72	29,6	46,4	61,2	67	131	153	167	194	—
43	Tc	7,23	14,87	31,9	43	59	76	94	161	183	195	—
44	Ru	7,36	16,6	30,3	46,5	63	81	100	119	192	216	—
45	Rh	7,46	15,92	32,8	45,6	67	85	105	126	147	225	—
46	Pd	8,33	19,42	33,4	48,8	66	90	110	132	155	178	—
47	Ag	7,574	21,48	36,10	52	70	89	116	139	162	187	—
48	Cd	8,991	16,904	44,5	55	73	94	115	146	170	195	—
49	In	5,785	18,86	28,0	58	77	98	120	144	178	204	—
50	Sn	7,332	14,63	30,7	46,4±0,1	81,1	103	126	150	176	213	—
51	Sb	8,64	16,7±0,5	24,8	44,1	63,8±0,5	107,6	132	157	184	211	—
52	Te	9,01	18,8±0,5	30,6	37,9	66±1	83±2	137,1	164	192	220	—
53	I	10,44	19,0	31,4	41,7	71	83±2	104±2	169,9	200	229	—
54	Xe	12,127	21,2	32,1	45,5	57	69	102±3	126±3	204,7	238	—
55	Cs	3,893	25,1	34,6±0,7	45,5	62	74	108	122±3	150±4	256	—
56	Ba	5,210	10,01	37±1	48,8	62	80	93	106	144±4	158±5	—
57	La	5,61	11,43	19,17	52	66	80	100	114	151	165±5	—
58	Ce	6,91	2,3	19,5	36,7	70	85	100	122	137	172	—
59	Pr	5,76	—	—	—	—	89	106	122	146	162	—
60	Nd	6,31	—	—	—	—	—	110	128	147	171	—
61	Pm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
62	Sm	5,6	11,2	—	—	—	—	—	—	161	181	—
63	Eu	5,67	11,24	—	—	—	—	—	—	—	187	—
64	Gd	6,16	12	—	—	—	—	—	—	—	—	—
65	Tb	6,74	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
66	Dy	6,82	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
67	Ho	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
68	Er	6,08±0,03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
69	Tm	6,14±0,06	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
70	Yb	6,26	12,10	—	—	—	—	—	—	—	—	—
71	Lu	6,15	14,7	19	—	—	—	—	—	—	—	—
72	Hf	5,5	14,9	21	31	—	—	—	—	—	—	—
73	Ta	7,88	16,2±0,5	22,3	33,1	45	—	—	—	—	—	—
74	W	7,98	17,7±0,5	24,1	35,4	48	61	—	—	—	—	—
75	Re	7,87	16,6±0,5	26	37,7	51	64	79	—	—	—	—
76	Os	8,7	17±1	25	40	54	68	83	99	—	—	—
77	Ir	9,2	17,0±0,3	27	39	57	72	88	104	121	—	—
78	Pt	8,96	18,54±0,1	28,5	41,1	55	75	92	109	127	146	—
79	Au	9,223	20,5	30,5	43,5	58	73	96	114	133	153	—
80	Hg	10,434	18,761	34,21	46	61	77	94	120	139	159	—
81	Tl	7,106	20,42	29,8	50,7	64	81	98	116	145	166	—
82	Pb	7,415	15,03	31,93	42,3	69,73	84	103	122	142	173	—
83	Bi	7,287	19,3	25,6	45,3	56	94,42	107	127	148	169	—
84	Po	8,2±0,4	19,4±1,7	27,3±0,8	38	61	73	112	132	154	176	—
85	At	9,2±0,4	20,1±1,7	29,3±0,9	41	51	78	91	138	160	183	—
86	Rn	10,745	21,4±1,8	29,4±1,0	43,8	55	67	97	111	166	190	—
87	Fr	3,98±0,1	22,5±1,8	33,5±1,5	43	59	71	84	117	133	197	—
88	Ra	5,277	10,144	34,3	46,4	58,5	76	89	103	140	156	—
89	Ac	6,89±0,6	11,5±0,4	—	49	62	76	95	109	123	164	—
90	Th	6,95±0,06	11,5±1,0	20,0	28,7	65	80	94	115	130	145	—
91	Pa	—	—	—	—	—	84	100	115	138	154	—
92	U	6,2[4]	—	—	—	—	—	104	121	137	126	—

22.2. ПОТЕНЦИАЛЫ ИОНИЗАЦИИ МОЛЕКУЛ РАДИКАЛОВ

В табл. 22.2—22.6 приведены потенциалы ионизации молекул и радикалов. Имеющиеся во многих случаях различия между значениями потенциалов ионизации, определенными спектроскопическим и методом электронного удара, следует объяснить тем, что в первом случае потенциалы ионизации адиабатические, а во втором — вертикальные. Метод фотоионизации в большинстве случаев дает значения, близкие к адиабатическим [3].

Погрешности потенциалов ионизации в тех случаях, когда они указаны авторами, определяют только экспериментальный разброс значений и не содержат возможных систематических ошибок.

Молекулы разбиты по следующим классам: углеводороды, галогензамещенные углеводороды, азотсодержащие соединения, кислородсодержащие соединения и т. д. Внутри каждого класса молекулы расположены в

Таблица 22.2

Азотсодержащие молекулы и радикалы [1.3]

Соединение	Потенциал ионизации, эв	Соединение	Потенциал ионизации, эв
NH	13,10±0,05	C ₇ H ₅ N	7,34
NH ₂	11,4±0,1	N ₂	15,51; 15,60
NH ₃	10,15—10,40	N ₂ ⁺	50 [2]
ND ₃	11,52±0,03	N ₂ H ₂	9,85±0,1
CN	15,13	N ₂ H ₃	7,88±0,2
HCN	13,86	N ₂ H ₄	9,56±0,03
CH ₃ NH ₂	9,41±0,02	CH ₃ N —NH ₂	5,07
CH ₅ N	8,97	C ₂ N ₂	13,8
C ₂ N	12,8	(CH ₃) ₂ N—	8,12±0,1
CH ₂ CN	10,87±0,1	—NH ₂	
CH ₃ CN	11,96	(CH ₃) ₃ N ₂	4,95
C ₂ H ₅ N	9,94±0,15	NCC≡CCN	11,4±0,2
(CH ₃) ₂ NH	8,4	NH ₃	10,3±0,2
	8,93±0,03	CH ₃ N ₃	9,5±0,1
C ₂ H ₅ NH ₂	9,32	NF	12,0
	9,19±0,05	NF ₂	12,0±0,1
C ₂ H ₃ CN	10,75	NF ₃	13,2±0,2
C ₂ H ₅ CN	11,85	CH ₂ FCN	13,0±0,1
C ₂ N	14,3	N ₂ F ₄	12,04±0,10
C ₃ HN	11,6±0,2	CNCl	12,49±0,04
CH ₃ CHCN	9,76±0,1	CH ₂ ClCN	12,2±0,1
C ₃ H ₅ NH ₂	9,6±0,2	CNBr	11,95±0,08
n-C ₃ H ₇ NH ₂	9,17±0,04	CNI	10,98±0,05
(CH ₃) ₃ N	8,32±0,02		
C ₄ N	12,3		
(CH ₃) ₂ CCN	9,15±0,1		
n-C ₄ H ₉ NH ₂	9,19±0,04		
(C ₆ H ₅) ₂ NH	8,44±0,01		
C ₆ N	12,0		
C ₆ H ₇ N	7,70		

порядке нарастания числа атомов Н и С (например, С₂; С₂Н; С₂Н₂; ...), заместители — галогены — вводятся в порядке нарастания атомного номера (F, Cl, Br, I). Радикалы находятся перед соединениями, из которых они образуются.

Таблица 22.3

Углеводороды [1.3]

Соединение	Название	Потенциал ионизации, эв
H ₂	Водород	15,427
C	Графит	3,8; 4,39
CH ₂	Метилен	11,82±0,05
CH	Метил	9,86±0,02
CD ₃	—	9,95±0,03
CH ₄	Метан	12,99±0,01; 11,2 [2]
CD ₄	—	13,25
C ₂ H ₂	Ацетилен	11,41±0,01
C ₂ H ₃	Этинил (винил)	9,45±0,05
C ₂ H ₄	Этилен	10,516±0,01
C ₂ H ₅	Этил	8,80±0,05
C ₂ H ₆	Этан	11,65
C ₃ H ₃	Пропаргил	8,25±0,08
C ₃ H ₄	Метилацетилен	10,34
C ₃ H ₅	Пропилен	9,73±0,01
C ₃ H ₆	Циклопропан	10,06±0,02
C ₃ H ₇	Пропан	11,08
C ₄ H ₂	Диацетилен	10,73
C ₄ H ₆	Дивинил (бутадиен-1,3)	9,07
C ₄ H ₆	Диметилацетилен	11,46
C ₄ H ₆	Этилацетилен	10,18
C ₄ H ₈	Бутилен	9,58
C ₄ H ₈	Изобутилен	9,23
C ₄ H ₈	Метилциклопропан	9,88
C ₄ H ₁₀	Бутан	9,07
C ₅ H ₆	Циклопентадиен	8,58
C ₅ H ₆	(2-Метилбутадиен-1,3)	8,85
C ₅ H ₁₀	2-Метилбутен-1	9,12
C ₅ H ₁₀	Пентен-1	9,50
C ₅ H ₁₂	2,2-Диметилпропан (иопентан)	10,37
C ₆ H ₄	Фенилен	10,23±1
C ₆ H ₆	Бензол	9,245
C ₆ H ₁₀	Диизопропенил (2,3-диметилбутадиен-1,3)	8,72
C ₆ H ₁₀	Циклогексен	8,945
C ₆ H ₁₂	Гексен-1	9,46
C ₆ H ₁₂	Тетраметилэтилен	8,30
C ₆ H ₁₂	Циклогексан	9,08
C ₆ H ₁₄	Гексан	10,17
C ₇ H ₇	Толлил	7,73±0,08
C ₇ H ₈	Толуол	8,820±0,005
C ₇ H ₁₄	Метилциклогексан	9,86
C ₇ H ₁₆	Гептан	10,06
C ₈ H ₈	Стирол	8,86±0,04
C ₈ H ₁₀	o-Ксилол	8,56; 7,61
C ₈ H ₁₀	Этилбензол	8,76
C ₈ H ₁₆	Октен-1	9,52
C ₈ H ₁₈	Октан	10,24; 9,86
C ₉ H ₁₂	Пропилбензол	8,72
C ₉ H ₂₀	Ноан	10,21
C ₁₀ H ₈	Нафталин	8,12±0,02
C ₁₀ H ₁₄	Бутилбензол	8,69
C ₁₀ H ₂₂	Декан	10,19
C ₁₄ H ₁₀	Антрацен	7,38
(CH ₂) _n	Полнметилен	10,15

Молекулы и радикалы, содержащие галогены [3]

Молекулы и радикалы, содержащие кислород [3]

Соединение	Потенциал ионизации, эв	Соединение	Потенциал ионизации, эв
HF	15,77 ± 0,02	C ₂ F ₂ Cl ₂	10,0 ± 0,2
F ₂	15,83 ± 0,05	C ₂ F ₃ Cl	10,4 ± 0,2
CF	13,81 ± 0,12	C ₂ Cl ₄	9,5
CF ₂	13,30 ± 0,12	C ₂ H ₅ Cl	10,97 ± 0,02
CHF ₂	9,45	CH ₃ C≡CCl	9,9 ± 0,1
CF ₃	10,10 ± 0,05		9,07 [1]; 9,42
CH ₃ F	12,85 ± 0,01	HBr	11,62 [1]; 12,04
CF ₄	17,8	Br ₂	10,55 ± 0,02
C ₂ H ₃ F	10,37	BrCl	11,1 ± 0,2
H ₂ C=CF ₂	10,30	CBF ₂	10,11 ± 0,09
C ₂ H ₄ F	10,14	CH ₃ Br	8,34 ± 0,11
C ₂ H ₅ F	12,00 ± 0,04	CHBr ₂	8,13
CH ₂ =CHCF ₃	10,9	CH ₃ Br	10,54 ± 0,01
C ₆ H ₄ F	10,86	CHBrF ₂	12,1 ± 0,2
C ₆ H ₅ F	9,197 ± 0,005	CF ₃ Br	12,3 ± 0,3
C ₆ ClF ₅	10,4	CH ₂ Br ₂	10,8 ± 0,1
C ₆ BrF ₅	9,6	C ₂ H ₃ Br	9,80
C ₆ F ₅ CH ₃	9,6	<i>μ</i> ис-BrHC=	9,69 ± 0,05
HCl	12,74 ± 0,01	=CHBr	
ClF ₃	13,0 ± 0,2	C ₂ HBr ₃	9,27
Cl ₂	11,48 ± 0,01	C ₂ H ₅ Br	10,29 ± 0,01
CCl	12,9 ± 0,1	CH ₃ -C≡CBr	10,1 ± 0,1
CCl ₂	13,10 ± 0,08		8,98 [1]; 9,41 ± 0,04
CH ₂ Cl	9,70 ± 0,09	HI	10,38 ± 0,02
CCl ₃	8,78 ± 0,05	IF ₆	13,5 ± 0,2
CH ₃ Cl	11,28 ± 0,01	ICl	10,4 ± 0,2
CF ₃ Cl	12,92 ± 0,01	IBr	10,3 ± 0,2
CClF	13,13 ± 0,25	I ₂	9,28 [1]; 9,35 ± 0,03
CCl ₂ F	8,96 ± 0,15	CH ₃ I	9,51 ± 0,02
CCl ₃	7,92 ± 0,35	CF ₃ I	10,0 ± 0,3
CCl ₄	11,1; 11,47 [1]	C ₂ H ₅ I	9,33 ± 0,01
CH ₂ Cl ₂	11,4 ± 0,1	<i>n</i> -C ₃ H ₇ I	9,4 ± 0,04
CF ₂ Cl ₂	11,8 ± 0,5	CH ₂ I-C ₄ H ₉	9,19 ± 0,01
CHCl ₃	11,42 ± 0,03		8,73 [1]; 9,10 ± 0,04
C ₂ HCl ₃	9,47 ± 0,01		8,35 ± 0,1
C ₂ H ₃ Cl	9,995		
Cl ₂ C=CH ₂	9,79		
<i>μ</i> ис-ClHC-CHCl	9,67 ± 0,05		

Соединение	Потенциал ионизации, эв	Соединение	Потенциал ионизации, эв
OH	13,18 ± 0,1	HCOOCH ₃	10,82
H ₂ O	12,60 ± 0,01	CH ₃ COCHO	9,60 ± 0,06
CO	14,01 ± 0,01 [2,3]	C ₂ H ₅ COOH	10,47
CO ⁺	43 [2]	CH ₃ COOCH ₃	10,27
CH ₂ O	10,90 ± 0,03	<i>n</i> -C ₃ H ₇ COOH	10,22
CH ₃ O	9,2	O ₃	11,7
CH ₂ OH	8,2	FO	13,0
CH ₃ OH	10,95 ± 0,10	F ₂ O	13,7 ± 0,2
CH ₂ =C=O	9,60 ± 0,2	HFC=O	11,4
C ₂ H ₅ O	9,2	(CF ₃) ₂ C=O	11,82
C ₂ H ₄ OH	7,0	ClO	10,4
C ₂ H ₅ OH	10,25 [1]; 10,65	COCl ₂	11,77 ± 0,04
(CH ₃) ₂ O	10,00 ± 0,02	CH ₂ ClCOCH ₃	9,91 ± 0,02
<i>n</i> -C ₃ H ₇ OH	10,42 ± 0,10	CHCl ₂ COCH ₃	10,12 ± 0,03
<i>n</i> -C ₄ H ₉ OH	10,30 ± 0,10	ClO ₂	11,1
(C ₂ H ₅) ₂ O	9,53 ± 0,02	ClO ₃	11,7
C ₆ H ₅ OH	8,50 ± 0,01	ClO ₃ F	13,6 ± 0,2
(C ₆ H ₅)HC=O	9,51 ± 0,02	NO	9,25 ± 0,02 [3]
O ₂	14,01 [1]; 12,075 ± 0,01	NH ₂ HC=O	10,16 ± 0,03
O ₂ ⁺	50 [2]	N ₂ O	12,63—12,90 [1—3]
HO ₂	11,53 ± 0,1	NO ₂	9,78—12,3
H ₂ O ₂	10,92 ± 0,05	CH ₃ ONO	10,7
CO ₂	13,79 ± 0,01	CH ₃ NO ₂	11,34 ± 0,09
HCOO	9,0		
COOH	8,7		
HCOOH	11,05 ± 0,03		
CHOCHO	9,48 ± 0,08		
(H ₂ CO) ₂	10,51 ± 0,03		
CH ₃ COOH	10,38 ± 0,03		

Молекулы и радикалы, содержащие бор, кремний, серу и другие элементы [3]

Соединение	Потенциал ионизации, эв	Соединение	Потенциал ионизации, эв
BH	10,06	(CH ₃) ₂ S	8,684
BH ₂	8,12	CH ₃ CH ₂ SH	9,21±0,05
BH ₃	10,09	SO ₂	12,34±0,02
BCH ₃	9,28	SF ₆	19,3
BC ₂ H ₅	8,73	S ₂	8,3±0,2
B(CH ₃) ₂	6,44	CS ₂	10,08—10,15
B(CH ₃) ₃	8,8±0,2	S ₈	8,9±0,2
B(C ₂ H ₅) ₂	5,90	He ₂	4,251 [2]
B ₂ H ₆	11,9	LiI	8,55±0,15
B ₅ H ₉	10,8±0,5	NaI	8,8±0,3
B ₁₀ H ₁₄	11,0±0,5	NaN ₃	11,7±0,2
BF ₃	15,5±0,5	MgC ₅ H ₅	7,62
BCl	10,4	AlF	9—10
BCl ₂	7,20	Al ₂ O	7,7±0,2
BCl ₃	10,91	PH ₃	10,0±0,2
BBr	9,25—10,14	PCl ₃	12,3
BBr ₂	7,06	KI	8,3±0,2
BBr ₃	9,7	TiCl ₄	11,7±0,2
BI	8,96	VC ₅ H ₅	6,63
BI ₂	7,13	CrC ₅ H ₅	8,90
BI ₃	9,0	CrO ₂ F ₂	14,0±0,2
SiH ₄	12,2±0,3	CrO ₂ Cl ₂	12,6±0,3
SiH(CH ₃) ₃	9,8±0,3	Cr(CO) ₆	8,03 [1]
SiF	7,2	MnC ₅ H ₅	7,94
SiF ₄	15,4±0,4	FeC ₅ H ₅	9,78
SiCl ₄	11,6±0,2	Fe(CO) ₅	7,95 [1]
SiO	10,8±0,5	CoC ₅ H ₅	10,05
SiO ₂	11,7±0,5	Ni(CO) ₄	8,28 [1]
Si ₂ O ₂	10±1	NiC ₅ H ₅	9,32
P(CF ₃) ₃	11,3±0,1	GeH ₄	12,3±0,3
PAs	11,2±0,5	Ge(CH ₃) ₄	9,2±0,2
PAs ₃	10,0±0,3	GeF	7,2
P ₂	11,8±0,5	Ge ₂	8,1
P ₂ As ₂	10,3±0,3	Ge ₃	8,1
P ₃ As	10,3±0,3	AsH ₃	10,6±0,1
P ₄	10,8±0,3	As(CH ₃) ₃	8,3±0,1
H ₂ S	10,46±0,01	AsCl ₃	12,4
CS	10,7±0,3	As ₂	11,0±0,5
CHS	6,8	As ₃	9,9±0,2
CH ₃ S	6,7	SeH ₂	9,88
CH ₃ SH	9,44	Mo(CO) ₆	8,12 [1]
C ₂ H ₃ S	9,1	SnH ₄	11,7±0,3
		Sn(CH ₃) ₄	8,25±0,15
		SnF ₄	7,0
		SbCl ₃	11,5
		Sb ₂	8,4±0,3
		Sb ₃	7,7±0,1
		Ba ₃ O	~4
		W(CO) ₆	8,18
		Hg(CH ₃) ₂	8,90±0,2
		Pb(CH ₃) ₄	8,0±0,4
		PbTe	8,2±0,5
		UCl ₄	11,5

22.3. СРОДСТВО К ЭЛЕКТРОНУ И ПРОТОНУ

Сродством к электрону χ называется энергия, выделяемая при образовании отрицательного иона из нейтрального атома и электрона, т. е. отвечающая процессу $A + e^- = A^-$. При этом предполагается, что до образования отрицательного иона нейтральный атом находился в состоянии с наименьшей энергией. Сродство к электрону с обратным знаком представляет собой потенциал ионизации, т. е. энергию, необходимую для отрыва электрона от отрицательного иона с образованием нейтрального атома (молекулы).

В случае присоединения к атому (молекуле) нескольких электронов указывается их число, например $N + 3e^-$.

Таблица 22.7

Сродство атомов к электрону [1, 5]

АТОМ	χ , эв	АТОМ	χ , эв
H	0,754	As	2,0
He	0,08	Se	2,0; 3,7 [3]
Li	0,6; 0,82 [3]	Br	3,37; 3,54 [3]
Be	He существует	Rb	0,27
B	0,3	Sr	He существует
C	1,2	Y	0,3
C+4e ⁻	30,7	Zr	0,8
N	0,2 [6]; 0,69	Nb	1,3
N+3e ⁻	23,7	Mo	1,3
O	1,46	Tc	1,0
O+2e ⁻	6,76±0,04	Ru	1,4
F	3,40—3,62 [3, 5]	Rh	1,5
Ne	He существует	Pd	1,2
Na	0,35—1,21	Ag	2,0; 2,5 [3]
Mg	He существует	Sn	1,8
Al	0,5	Sb	1,5; 2,0 [3]
Si	1,4—2,0	Te	2,0; 3,6 [3]
P	0,8—0,9	I	3,08—3,23
S	2,07—2,33 [3, 6]	Cs	0,23
S+2e ⁻	3,47	La	0,6
Cl	3,82±0,06	Hf	He существует
Ar	He существует	Ta	0,2
K	0,3—0,69	W	1,2
Ca	He существует	Re	0,4
Ti	0,4	Os	1,4
V	0,8	Ir	2,0
Cr	1,0	Pt	2,6
Mn	He существует	Au	2,1 [3]; 2,8
Fe	0,5	Hg	1,54—1,8 [3, 2]
Co	0,9	Tl	2,1
Ni	1,3	Pb	1,6
Cu	1,9—2,4 [3, 5]	Bi	0,7

Сродство к электрону молекул и радикалов [1, 3]

Соединение	χ , эв	Соединение	χ , эв	Соединение	χ , эв	Соединение	χ , эв
H ₂	0,72	HO ₂	3,4	C ₆ H ₅ CH=CH ₂	0,29	ClO ₃	3,96
CH	~1,65	CO ₂	3,8	C(C ₆ H ₅) ₃	2,08 ± 0,22	ClO ₄	5,81
CH ₂	0,95	NO ₂	1,62; 3,82 ± 0,06	Графит	4,39	Cl ₂	≤ 1,7
CH ₃	1,08; 1,8	O ₃	2,89	NH ₂	1,21	SiCl ₂	> 2,6
C ₂	3,1	NO ₃	3,88	CN	3,7 ± 0,2	CCl ₃	≥ 2,10 ± 0,35
C ₂ H ₄	1,81	BF ₃	0,78; 2,17	OH	1,73 ± 2,65	SeH	2,04
C ₂ H ₆	1,4	SiC	~ 4	H ₂ O	0,9	SeO ₂	~ 2,3
C ₃	1,8	SH	2,6	C ₆ H ₅ O	1,17	Br ₂	2,6
H ₂ C=CH-CH ₂	2,1	SO	≥ 1,8	NO	3,2 ± 0,2	MoO ₃	2,73
n-C ₃ H ₇	1,0	SO ₂	1,1; 2,8	O ₂	0,3—0,87 [1—3]	AgCl	3,79
изо-C ₃ H ₇	1,0	ClO	2,91			AgBr	3,57
C ₆ H ₆	0,54	ClO ₂	3,43			AgI	3,29
C ₆ H ₅ CH ₂	1,8					I ₂	2,4

Таблица 22.9

Сродство некоторых атомов и молекул к протону [9]

Атом	Сродство к протону, эв	Молекула	Сродство к протону, эв
H	2,75	H ₂	3,0
He	1,8	CH	5,1
C	6,0	CH ₂	5,2
O	4,9	CH ₃	5,1
F	3,7	CH ₄	5,3
Ne	2,2	C ₂ H ₄	6,8
Cl	5,4	HCl	5,2
Ar	2,3	OH	6,2
Br	5,8	H ₂ O	7,3
Kr	3,7	NH ₃	9,4
I	6,4	H ₂ S	7,6

22.4. ФОТОИОНИЗАЦИЯ АТОМОВ

Атомы ионизируются при поглощении квантов света, энергия которых равна потенциалу ионизации атома или превосходит его. Сечение фотоионизации σ_f есть отношение вероятности ионизации атома в единицу времени к плотности падающего светового потока; σ_f имеет размерность [см²]. Коэффициент поглощения K связан с σ_f соотношением $K = N\sigma_f$, где N — число атомов в единице объема.

Сечения σ_f имеют сложную структуру, зависящую от длины волны падающего света и строения электронных оболочек атома-мишени.

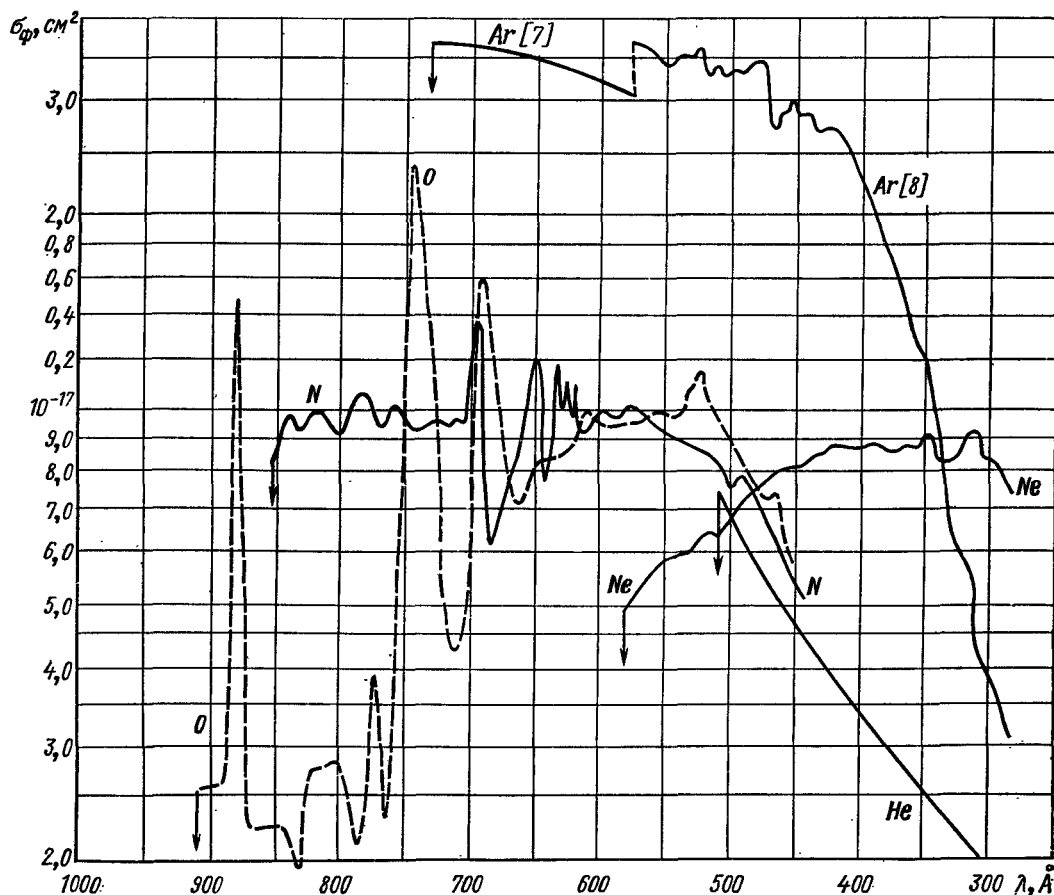
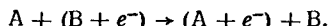


Рис. 22.1. Сечения фотоионизации He [7], атомарных азота и кислорода [8], Ne [8] и Ar [7,8]. (Стрелками у длинноволнового края кривых указаны пороги фотоионизации.)

22.5 ПЕРЕЗАРЯДКА ПРИ АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ

Перезарядкой называют обмен электроном при столкновении двух атомных систем (атомов, ионов, молекул и т. п.):



Эффективное сечение перезарядки σ есть отношение вероятности обмена электроном в единицу времени к плотности потока налетающих частиц A при единичной плотности частиц мишени. Сечение резонансной перезарядки обычно превышает сечение упругого рассеяния иона на атоме даже при тепловых энергиях столкновения.

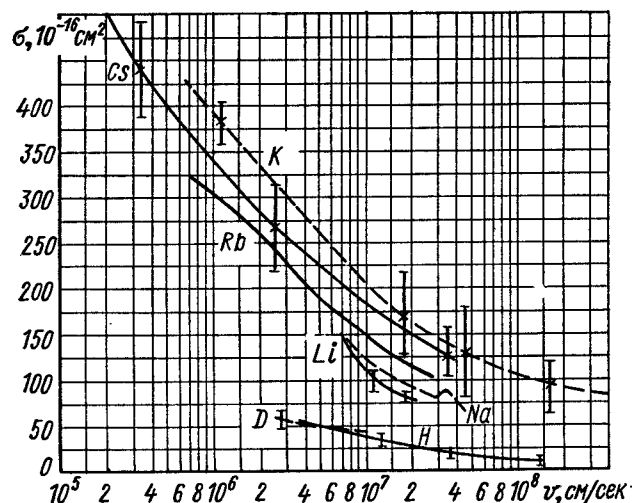


Рис. 22.2. Зависимость сечения резонансной перезарядки ионов на нейтральных атомах этих элементов от скорости ионов. Кривые получены усреднением экспериментальных данных, собранных в работе [5]. Погрешности указывают на разброс данных различных авторов.

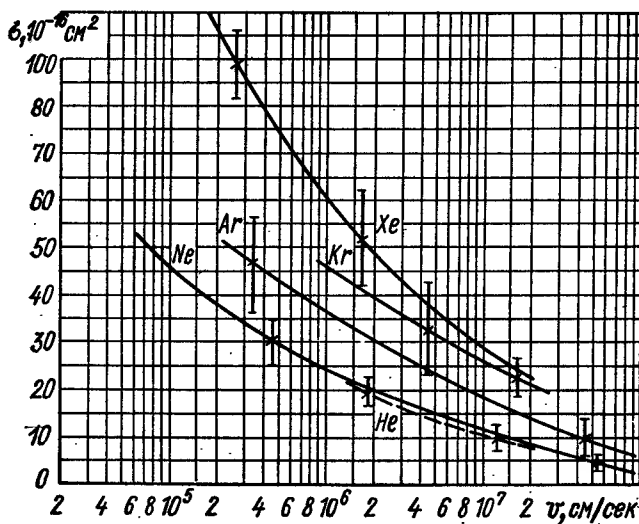


Рис. 22.3. Зависимость сечения резонансной перезарядки ионов гелия, неона, аргона, криптона и ксенона на нейтральных атомах этих элементов от скорости ионов. (Кривые получены усреднением экспериментальных данных, собранных в работе [5]. Погрешности указывают на разброс данных различных авторов.)

22.6. ЭНЕРГИИ ДИССОЦИАЦИИ МОЛЕКУЛ

Таблица 22.10

Энергии диссоциации $E_{\text{дис}}$ двухатомных молекул [3]

Молекула	$E_{\text{дис}}$, эв	Молекула	$E_{\text{дис}}$, эв
Ag_2	1,8	Cu_2	0,2
AgBr	3,1	CuBr	3,4
AgCl	3,4	CuCl	3,7
AgH	2,36	CuF	3,0
AgI	2,6	CuH	2,9
AgO	2,5	CuI	3,0
AgSn	2,55	CuO	4,8
AlBr	4,6	D_2	4,55
AlCl	1,9	F_2	1,6
AlCl	5,1	FO	1,9
AlF	7,65	H_2	4,48
AlH	2,9	HD	4,51
AlI	3,84	HT	4,52
AlO	5,0	HBr	3,75
AlS	3,5	HCl	4,43
AsN	6,6	HF	5,9
AsO	5,0	HI	3,05
Au_2	2,28	Hg_2	0,06
AuAl	3,1	HgBr	0,7
AuCl	3,1	HgCl	1,0
AuCr	2,2	HgF	1,8
AuCu	2,4	HgH	0,38
AuH	3,1	HgI	0,36
AuMg	2,7	HgS	2,8
AuSn	2,55	I_2	1,54
BBr	4,5	IBr	1,82
BCl	5,2	ICl	2,15
BF	8,1	IF	2,9
BH	3,0	IO	1,9
BO	7,45	K_2	0,51
BaBr	2,8	KBr	3,95
BaCl	2,7	KCl	4,4
BaF	3,8	KF	5,1
BaH	1,8	KH	1,86
BaO	4,7	KI	3,33
BaS	2,4	Li_2	1,1
BeCl	4,8	LiBr	4,4
BeF	7,0	LiCl	4,8
BrCl	2,23	LiF	6,0
BrF	2,4	LiH	2,4
BrO	2,4	LiI	3,6
CaBr	2,9	LiO	3,4
CaCl	2,8	MnBr	3,2
CaF	3,1	MnCl	3,9
CaH	1,7	MnF	5,0
CaI	2,8	MnH	2,2
CaO	5,0	MnO	3,4
CaS	3,0	Na_2	0,73
C_2	6,2	NaBr	3,8
CCl	2,8	NaCl	4,2
CF	4,7	NaF	5,0
CH	3,47	NaH	2,1
CN	8,4	NaI	3,1
CO	11,1	NaK	0,61
Cl_2	2,48	N_2	9,76
ClF	2,6	NBr	2,9
ClO	2,8	NF	2,6
Cs_2	0,45	NH	3,6
CsBr	4,3	NO	3,5
CsCl	4,4	NS	5,0
CsF	5,0	O_2	5,1
CsH	1,9	OH	4,4
CsI	3,6		

Молекула	$E_{\text{дис}}, \text{ эв}$	Молекула	$E_{\text{дис}}, \text{ эв}$
P ₂	5,0	SO	5,3
Rb ₂	0,48	T ₂	4,59
RbBr	4,0	TlBr	3,4
RbCl	4,4	TlCl	3,8
RbF	5,4	TlF	4,7
RbH	1,8	TlH	2,0
RbI	3,3	TH	2,8
S ₂	4,3	ZnCl	2,6
SF	2,8	Zn H	0,85
SH	3,5	Zn I	1,4

Таблица 22.11

Энергия диссоциации молекулярных ионов [3]

Ион	$E_{\text{дис}}, \text{ эв}$	Ион	$E_{\text{дис}}, \text{ эв}$
Ar ₂ ⁺	1,1	HBr ⁺	4,0
As ₂ ⁺	2,56	HCl ⁺	4,7
AsO ⁺	7,7	HF ⁺	3,7
BH ⁺	1,3	HI ⁺	3,1
BCl ⁺	3,1	He ₂ ⁺	2,24
BeH ⁺	3,3	HgH ⁺	2,3
Br ₂ ⁺	3,3	I ₂ ⁺	2,8
C ₂ ⁺	5,5	IBr ⁺	2,0
CF ⁺	2,2	ICl ⁺	2,2
CH ⁺	3,6	K ₂ ⁺	0,75
CO ⁺	8,35	MgH ⁺	2,19
Cs ⁺	7,3	N ₂ ⁺	8,7
CdH ⁺	2,13	NO ⁺	10,9
Cl ₂ ⁺	4,2	O ₂ ⁺	6,7
ClO ⁺	5,3	O ₂ ⁻	4,1
Cs ₂ ⁺	0,7	OH ⁺	4,9
F ₂ ⁺	3,3	OH ⁻	4,7
FO ⁺	2,58	Rb ₂ ⁺	0,7
H ₂ ⁺	2,65	SiF ⁺	6,4
H ₂ ⁻	0,18	Xe ₂ ⁺	1,0

22.7. ЭНЕРГИИ РАЗРЫВА СВЯЗЕЙ
В МОЛЕКУЛАХ И РАДИКАЛАХ

Таблица 22.12

Энергия разрыва связей $E_{\text{разрыв}}$ в неорганических молекулах и радикалах [3]

Реакция	$E_{\text{разрыв}}, \text{ эв}$	Реакция	$E_{\text{разрыв}}, \text{ эв}$
ClO → Cl + O	2,7	(Li OH) → LiO + H	5,5
ClO ₂ → Cl + O ₂	2,5	NF ₂ → NF + F	2,6
FNO → NO + F	2,4	NF ₃ → NF ₂ + F	3,5
HF ₂ ⁻ → HF + F ⁻	2,5	NH ₃ → NH ₂ + H	4,2
HO ₂ → H + O ₂	2,0	NO ₂ → NO + O	3,1
HO ₂ → OH + O	2,8	N ₂ O → NO + N	5,0
H ₂ O → H + OH	5,0	N ₂ O → N ₂ + O	1,7
H ₂ O ₂ → 2OH	2,1	(NaBr) ₂ → 2 NaBr	2,0
H ₂ S → SH + H	4,0	(NaCl) ₂ → 2NaCl	2,2
(KBr) ₂ → 2KBr	2,0	(NaI) ₂ → 2NaI	1,9
(KCl) ₂ → 2KCl	1,8	NaOH → Na + OH	3,9
(KF) ₂ → 2KF	2,2	NaOH → Na + OH	4,8
(KI) ₂ → 2KI	1,7	O ₃ → O ₂ + O	0,11
(LiBr) ₂ → 2LiBr	2,0	(Rb Cl) ₂ → 2RbCl	1,9
(LiCl) ₂ → 2LiCl	2,6	(RbF) ₂ → 2RbF	2,1
(LiI) ₂ → 2LiI	1,8	SF ₂ → SF + F	3,0
(Li ₂ O) → LiO + Li	3,8	SO ₃ → SO ₂ + O	3,6
(Li OH) → Li + OH	4,5		

Таблица 22.13

Энергии разрыва связей $E_{\text{разрыв}}$ в органических молекулах и радикалах [3]

Связь	$E_{\text{разрыв}}, \text{ эв}$	Связь	$E_{\text{разрыв}}, \text{ эв}$
CBBr ₃ —Br	2,13	C ₂ H ₃ —H	4,5
CBBr ₃ —H	4,0	C ₂ H ₅ —BF ₂	4,2
CCl ₃ —Cl	2,9	C ₂ H ₅ —H	4,2
CF ₃ —Cl	3,5	C ₂ H ₅ —Li	2,07
CF ₃ —CN	5,3	C ₂ H ₅ —OH	4,0
CF ₃ —H	4,5	C ₂ H ₅ —SH	2,8
(CF ₃) ₂ As—CF ₃	2,5	C ₆ H ₅ —Br	3,1
CH—H	5,5	C ₆ H ₅ —I	2,65
CH ₂ —H	4,4	CHCl ₂ —H	3,9
CH ₂ CHCH ₂ —H	3,33	CHI ₂ —I	1,6
CH ₂ CH—I	2,9	CH ₂ Br—Br	2,7
CH ₃ —Br	2,9	CH ₂ F—CN	5,1
CH ₃ —BF ₂	4,3	CH ₃ Cd—CH ₃	1,8
CH ₃ —Cl	3,5	CH ₃ O—NO	1,59
CH ₃ —CN	4,5	CH ₃ O—NO ₂	1,66
CH ₃ —F	5,1	CH ₃ S—SCH ₃	3,3
CH ₃ —I	2,3	CO—H	1,32
CH ₃ —OH	3,9	NC—H	4,8
CH ₃ —NH ₂	3,5	NC—CN	5,5
CH ₃ —NO ₂	2,5	NC ₂ —CN	5,2
CH ₃ —SH	2,91	NC ₂ —N	7,0
C ₂ H—H	5,2	NC ₃ —N	6,8
C ₂ H ₃ —CHO	3,9	NC ₆ —N	7,05

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Справочник химика.** Под ред. Б. П. Никольского. Т. 1. Изд. 3-е. Л., «Химия», 1971.
2. **Аллен К. У.** Астрофизические величины. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
3. **Энергия разрыва химических связей.** Потенциалы ионизации и сродство к электрону. Справочник. Под ред. В. Н. Кондратьева. М., Изд-во АН СССР, 1962.
4. **Meggers W. F., Corliss C. H., Scribner B. F.** Tables of Spectral Line Intensities. National Bureau of Standards, 1961.

5. **Смирнов Б. М.** Асимптотические методы в теории атомных столкновений. М., Атомиздат, 1973.
6. **Дей М. К., Селбин Д.** Теоретическая неорганическая химия. Пер. с англ. М., «Химия», 1969.
7. **Хастед Дж.** Физика атомных столкновений. Пер. с англ. М., «Мир», 1965.
8. **Hudson R. D., Kieffer L. J.** «Atomic Data», 1971. v. 2, p. 205.
9. **Смирнов Б. М.** Атомные столкновения и элементарные процессы в плазме. М., Атомиздат, 1968.

ГЛАВА 23

ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД

23.1. ВВЕДЕНИЕ

Термином *газовый разряд* объединяются все явления, связанные с прохождением электрического тока через газ [1]. Обычно газовый разряд происходит между проводящими электродами, создающими граничную конфигурацию электрического поля и играющими значительную роль в качестве источников и стоков заряженных частиц. Однако наличие электродов не обязательно (высокочастотный, тороидальный разряд).

При достаточно больших давлениях и длинах разрядного промежутка основную роль в возникновении и протекании разряда играет газовая среда. Поддержание разрядного тока определяется поддержанием равновесной ионизации газа, происходящей при малых токах за счет таунсендовских процессов каскадной ионизации, а при больших токах — за счет термической ионизации.

При уменьшении давления газа p и длины разрядного промежутка d все большую роль играют процессы на электродах; при $pd < 0,02 \div 0,04$ мм рт. ст. · см процессы на электродах становятся определяющими и меньшие значения pd соответствуют области вакуумного разряда, или электрического пробоя вакуума*.

В области газового разряда ($pd \gg 0,04$ мм рт. ст. · см) произведение этих величин в значительной степени определяет характер возникновения и протекания разряда, в частности пробивное напряжение (закон Пашена).

При малых разрядных токах между холодными электродами в достаточно однородном электрическом поле основным типом разряда является тлеющий разряд, характеризующийся значительным (50 — 400 в) катодным падением потенциала. Катод в этом типе разряда испускает электроны под действием заряженных частиц и световых квантов, а тепловые явления не играют роли в поддержании разряда.

Тлеющий разряд в сильно неоднородном электрическом поле и при значительном давлении ($p \gtrsim 100$ мм рт. ст.) называется *коронным разрядом*.

Дуговой разряд наблюдается при силе тока не менее нескольких ампер. Для этого типа разряда характерно малое, порядка 10 в, катодное падение потенциала и высокая плотность тока. Для горения дугового разряда существенна высокая электронная эмиссия катода, термическая ионизация в плазменном столбе. Спектр дуги обычно содержит линии материала катода.

23.2. ПРОЦЕССЫ НА ЭЛЕКТРОДАХ

Возникновение и характер газового разряда в значительной степени зависят от эмиссии электронов из катода. В случае холодного катода эмиссия происходит в основном при ионной бомбардировке и облучении его фотонами; горячий катод испускает электроны в результате термоэлектрической эмиссии.

В случае коронного разряда и электрического пробоя вакуума заметную роль играет автоэлектронная эмиссия; на горячих электродах может также происходить образование ионов за счет поверхностной ионизации.

Основной материал по электронной эмиссии изложен в гл. 24. Ниже приводятся сведения о ионно-электронной эмиссии и поверхностной ионизации.

Ионно-электронная эмиссия. Ион, падающий на поверхность электрода, выбивает из нее электроны, имеющие энергию не более 10—30 эв (рис. 23.1 и 23.2).

Поверхностная ионизация. Адсорбированный атом может покинуть нагретую поверхность как в атомном, так и в ионизованном состоянии. Для того чтобы про-

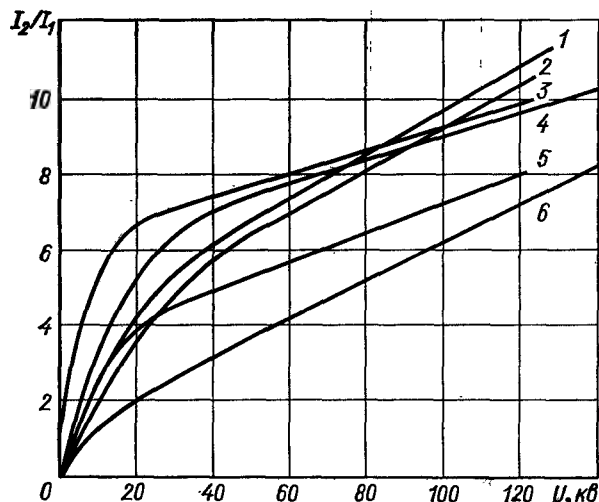


Рис. 23.1. Эмиссия электронов при падении ионов гелия на поверхность различных металлов:

1 — свинец; 2 — золото; 3 — алюминий; 4 — магний; 5 — сталь; 6 — медь [3].

* Вопросы вакуумного пробоя подробно освещены в работе [3].

цент ионов в потоке десорбированных частиц был значителен, необходимо выполнение условия $U > E_{\text{валент}}$, где U — работа выхода адсорбирующей поверхности,

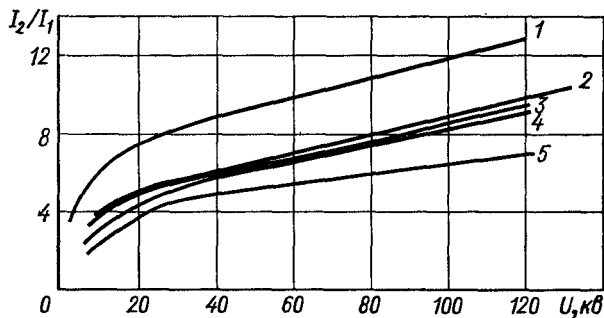


Рис. 23.2. Эмиссия электронов при падении различных ионов на поверхность алюминия:
1 — азот; 2 — ксенон; 3 — гелий; 4 — ртуть; 5 — водород [3].

$E_{\text{валент}}$ — энергия ионизации уровня валентного электрона адсорбированных атомов. Это условие выполняется при ионизации щелочных элементов на вольфраме и платине (рис. 23.3).

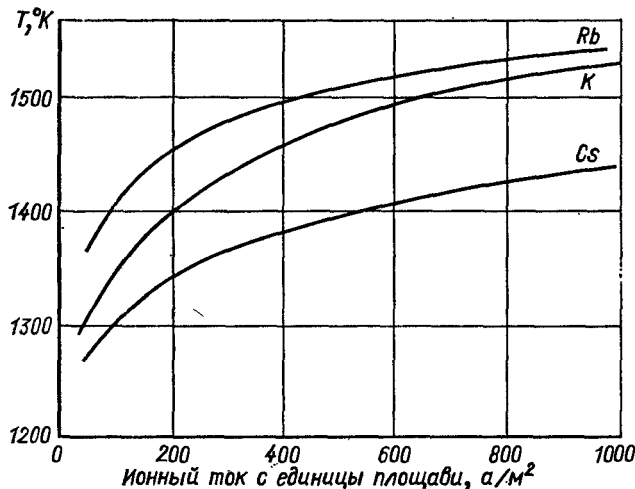


Рис. 23.3. Зависимость максимального значения тока ионов K, Rb, Cs от температуры поверхности вольфрама [4].

23.3. ПОДВИЖНОСТЬ И РЕКОМБИНАЦИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Подвижность ионов k_i и коэффициент их диффузии D_i связаны равенством [5]

$$k_i = N_e D_i / p.$$

Подвижность ионов не зависит от E/p вплоть до $E/p \ll 20$ в л/(см·мм рт.ст.).

Теория, учитывающая взаимодействие дипольных моментов иона и молекулы, дает для k_i следующее выражение [2]:

$$k_i = A \left[\frac{1 + m/m_i}{\rho(\epsilon - 1)} \right]^{1/2}. \quad (23.1)$$

Здесь m — масса молекулы; m_i — масса иона, ϵ — диэлектрическая постоянная газа. Постоянная A при больших (для газа) ϵ , малых температурах и малых размерах ионов и молекул равна 0,52, а при больших радиусах и температурах и малых ϵ уменьшается до 0,1.

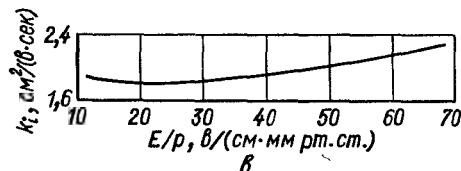
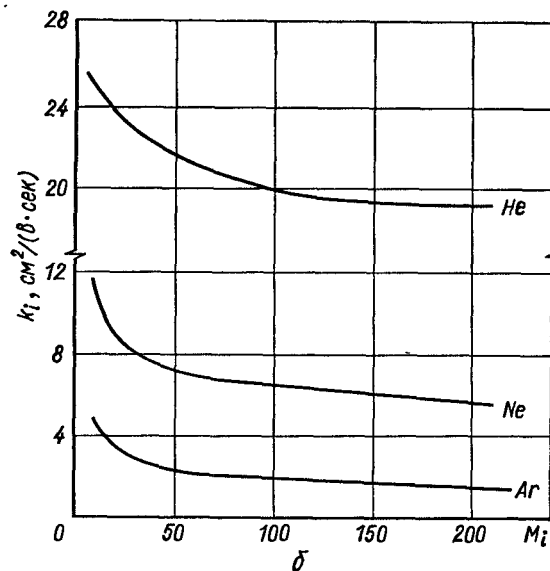
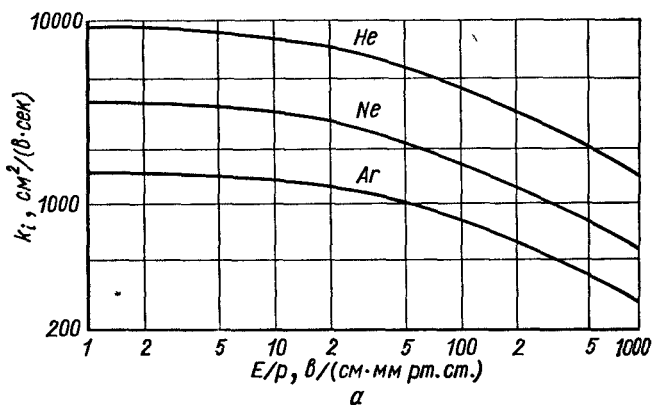
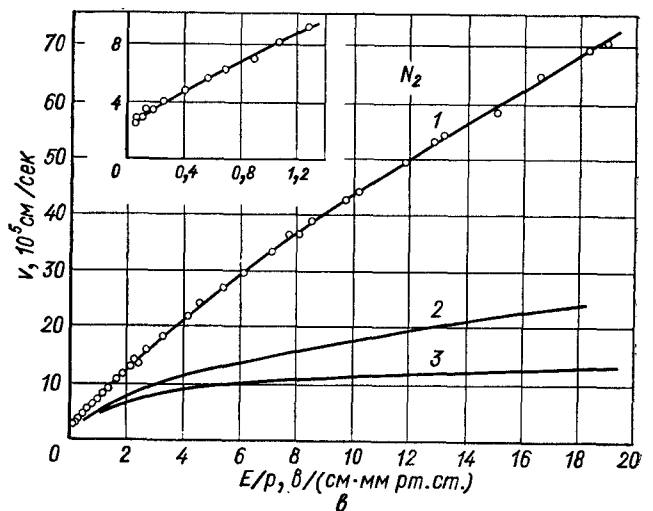
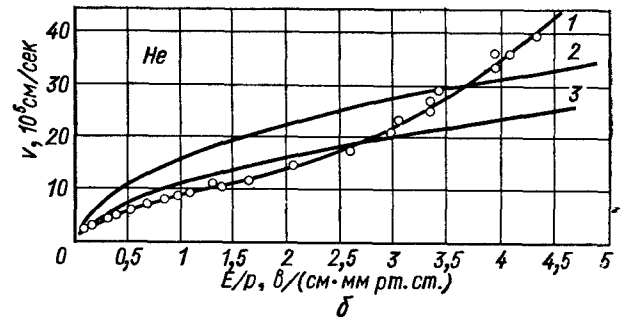
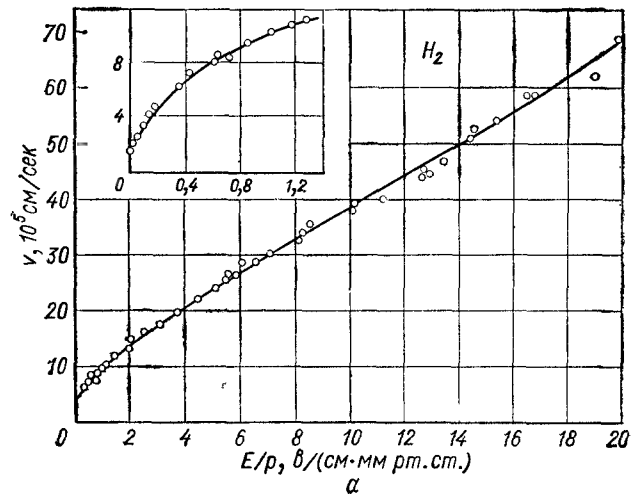
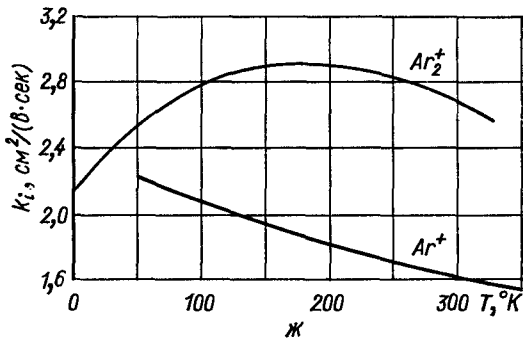
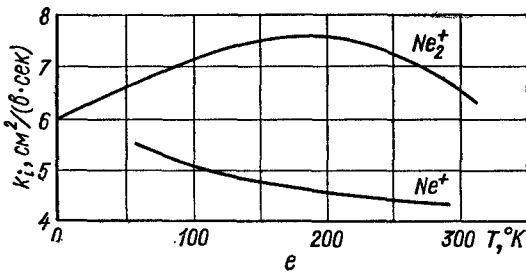
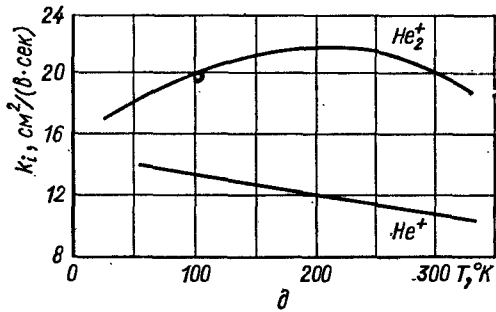
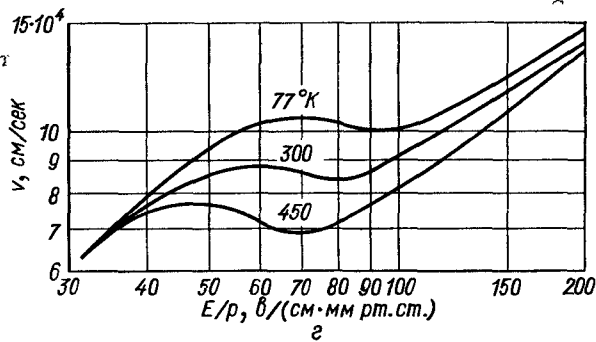


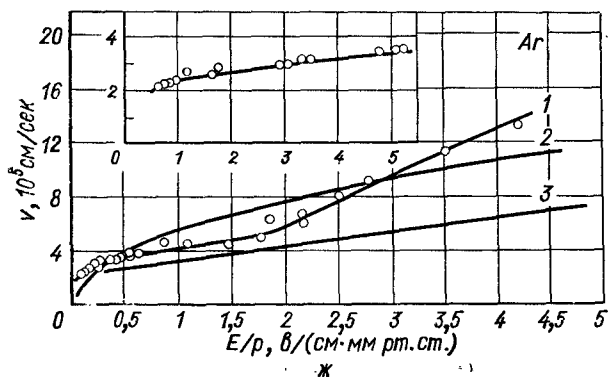
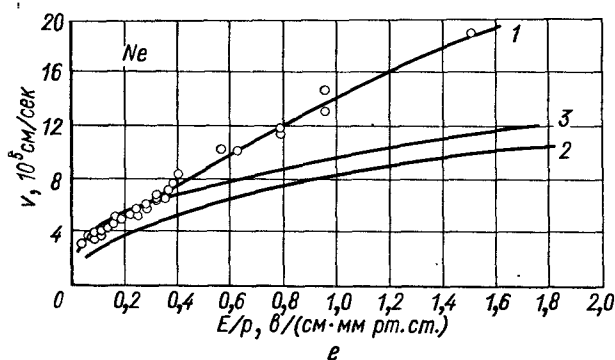
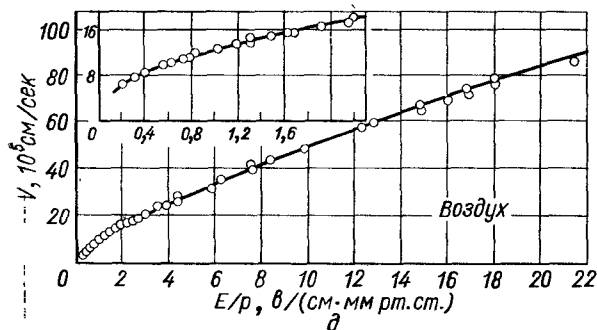
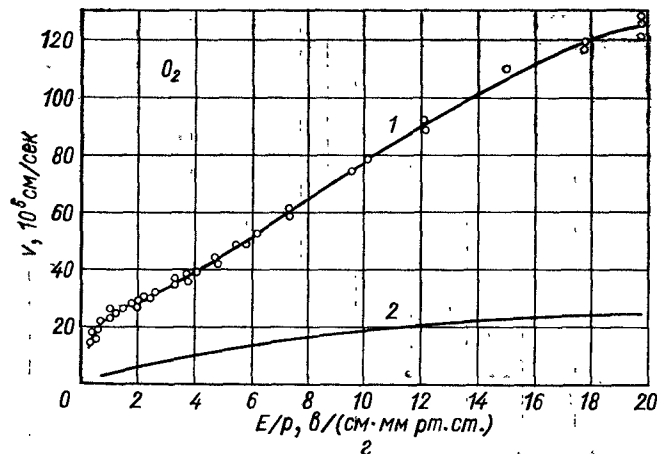
Рис. 23.4. Зависимость подвижности ионов в различных газах от E/p [8]:

а — подвижность собственных ионов в гелии, неоне и аргоне, $p=1$ мм рт.ст.; б — зависимость подвижности от массы иона в гелии, неоне и аргоне, $p=760$ мм рт.ст.; в — подвижность ионов



ртути в аргоне при 300°K, $p_{Ar} = 760$ мм рт. ст.; z — скорость дрейфа ионов в азоте при различных температурах; N_2^+ — для низких значений E/p и N_2^+ для высоких значений E/p ; плотность азота постоянна и соответствует нормальным условиям; δ — зависимость подвижности ионов гелия от температуры; e — зависимость подвижности ионов неона от температуры; $ж$ — зависимость подвижности ионов аргона от температуры (плотность гелия, неона и аргона постоянна и соответствует нормальным условиям).

Рис. 23.5. Зависимость скорости дрейфа электронов от E/p в различных газах [5]:
1 — эксперимент; 2, 3 — теория.



Электроны даже в слабых полях приобретают энергию, значительно превышающую тепловую, поэтому их скорость дрейфа нелинейно зависит от напряженности поля (рис. 23.5).

Коэффициент объемной рекомбинации α определяет скорость взаимной нейтрализации заряженных частиц и связан с их концентрацией соотношением

$$dN_{\pm} / dt = -\alpha N_{+} N_{-}. \quad (23.2)$$

При малых давлениях ($p < 1$ атм) коэффициент ион-ионной рекомбинации определяется соотношением [2]

$$\alpha_{ii} = \frac{8\pi}{27} \cdot \frac{e^6}{(k_0 T)^3} \cdot \frac{1}{\lambda_i} \sqrt{\frac{6k_0 T_i}{M}}. \quad (23.3)$$

Здесь λ_i и T_i — длина свободного пробега и температура ионов.

При высоких давлениях газа

$$\alpha_{ii} = 4\pi e (k_i + k_e) \quad (23.4)$$

(см. рис. 23.6 и табл. 23.2).

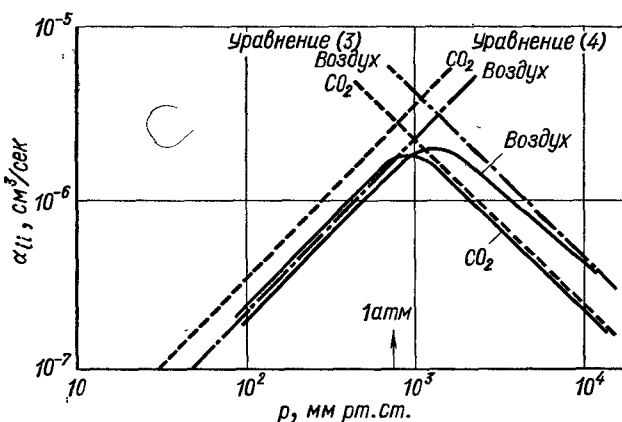


Рис. 23.6. Зависимость коэффициента рекомбинации ионов α_{ii} в воздухе и CO_2 от давления [2].

Таблица 23.1

Среднее число столкновений электрона δ до момента прилипания к нейтральному атому [1]

Газ	δ	Газ	δ
Инертные газы,	∞	Воздух	$2,1 \cdot 10^5$
H_2 , N_2	$1,6 \cdot 10^8$	O_2 , H_2O	$4,0 \cdot 10^4$
CO	$9,9 \cdot 10^7$	Cl_2	$2,1 \cdot 10^3$
NH_3	$6,1 \cdot 10^6$		
N_2O			

Таблица 23.2

Коэффициенты ион-ионной рекомбинации α_{ii}
в собственном газе [2]
 $p = 760$ мм рт. ст., $T = 0^\circ\text{C}$, возраст ионов $\approx 0,1$ сек)

Газ	$\alpha_{ii} \cdot 10^{-6}$ см ³ /сек	Газ	$\alpha_{ii} \cdot 10^{-6}$ см ³ /сек
CO ₂	1,7	SO ₂	1,4
O ₂	1,5	H ₂ O	0,9 (100°C)
Воздух	1,4	CO	0,85
N ₂ O	1,4		

Таблица 23.3

Коэффициенты ион-электронной рекомбинации α_{ie}
в различных газах [2]

Газ	p , мм рт. ст.	Температура электронов, эв	α_{ie}
Hg	0,3	0,15	$2 \cdot 10^{-10}$
Cs	0,01—0,1	0,15	$(3 \div 4) \cdot 10^{-10}$
He	1	0,03	$1,7 \cdot 10^{-8}$
Ne	15—30	0,03	$2 \cdot 10^{-7}$
O ₂	2—20	0,03	$2,7 \cdot 10^{-7}$
Ar	15—30	0,03	$3 \cdot 10^{-7}$
N ₂	2—5	0,03	$1,4 \cdot 10^{-6}$
H ₂	3—12	0,03	$2,5 \cdot 10^{-6}$

В инертных газах α_{ie} растет с увеличением плотности газа. При $T < 300^\circ\text{K}$ $\alpha_{ie} \sim \sqrt{p}$.

23.4. СЛАБОТОЧНЫЕ РАЗРЯДЫ

Тлеющий разряд. Тлеющий разряд возникает в достаточно однородном электрическом поле между холодными электродами при давлении от $\sim 0,1$ до десятков и сотен миллиметров ртутного столба. Катод в этом тле разряда испускает электроны вследствие его бомбардировки образующимися в зоне разряда ионами и световыми квантами.

Основную роль в возникновении тлеющего разряда играет лавинный процесс размножения электронов. Он описывается формулой Таунсенда [2]:

$$i = i_0 \frac{\exp(\alpha d)}{1 - \gamma [\exp(\alpha d) - 1]},$$

где i_0 — ток первичных электронов; d — длина разрядного промежутка; α — первый коэффициент ионизации Таунсенда, определяющий число новых электронов, создаваемых первичным электроном при прохождении 1 см пути в направлении поля; γ — второй коэффициент ионизации Таунсенда, равный числу электронов, выбиваемых из катода одним положительным ионом. Обращение знаменателя этого выражения в нуль соответствует пробую газового промежутка.

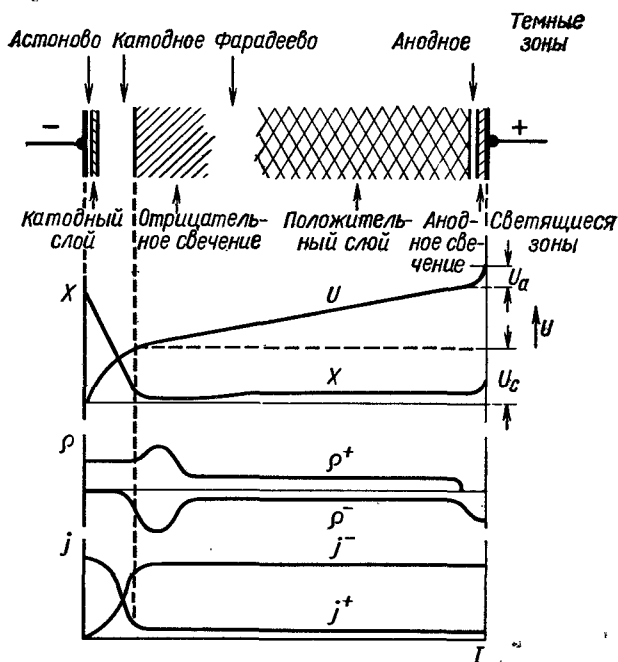


Рис. 23.7. Пространственное распределение темных и светящихся зон, напряженности электрического поля X , потенциала U , плотностей пространственного заряда ρ^+ и ρ^- и плотностей тока j^+ и j^- в тлеющем разряде (схема) [2].

На рис. 23.7 показано пространственное распределение темных и светящихся зон, электрического поля и других характеристик тлеющего разряда.

Изменение расстояния между катодом и анодом влияет лишь на длину положительного столба, а изменение давления ведет к обратно пропорциональному изменению длины прикатодных и прианодных областей разряда.

Таблица 23.4

Катодное падение потенциала в различных газах, в [2]

Материал катода	H ₂	He	Ne	N ₂	Воздух	Ar	Hg	Другие газы
C	280	—	—	—	424	—	475	575 (CO)
Al	170	140	120	180	230	100	245	280 (Cl ₂)
K	94	60	68	170	180	64	—	80 (K)
Fe	250	150	150	215	270	165	300	290 (O ₂) 306 (Xe) 80 (K) 340 (Cs)
Ni	210	160	140	200	226	130	275	—
Cu	214	177	220	208	375	130	450	484 (CO) 460 (CO ₂)
Zn	184	143	—	216	280	119	—	354 (O ₂) 480 (CO)
Pt	276	165	152	216	277	130	—	364 (O ₂) 275 (Cl ₂)
Hg	337	143	—	226	—	—	340	—

Приведенная ширина темного катодного пространства $d_{\text{пр. см. мм рт. ст.}}$ для различных газов [2]

Материал катода	$i_{\text{с}}$	He	Ne	Ar	Воздух	Ag	Hg	Другие газы
C	0,9	—	—	—	—	—	0,69	—
Mg	0,61	1,45	—	0,35	—	—	—	0,25 (O ₂)
Al	0,72	1,32	1,64	0,31	0,25	0,29	0,33	0,24 (O ₂)
Fe	0,9	1,3	0,72	0,42	0,52	0,33	0,34	0,31 (O ₂) 0,23 (Xe)
Cu	0,8	—	—	—	0,23	—	0,6	—
Hg	0,9	—	—	—	—	—	—	—

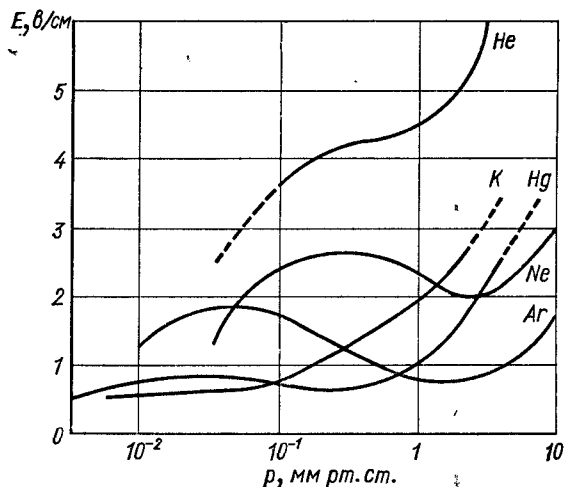
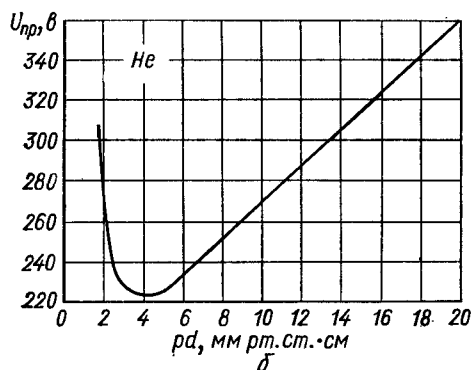
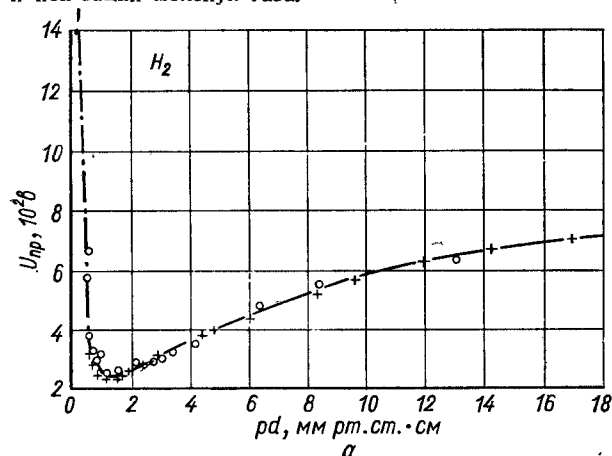


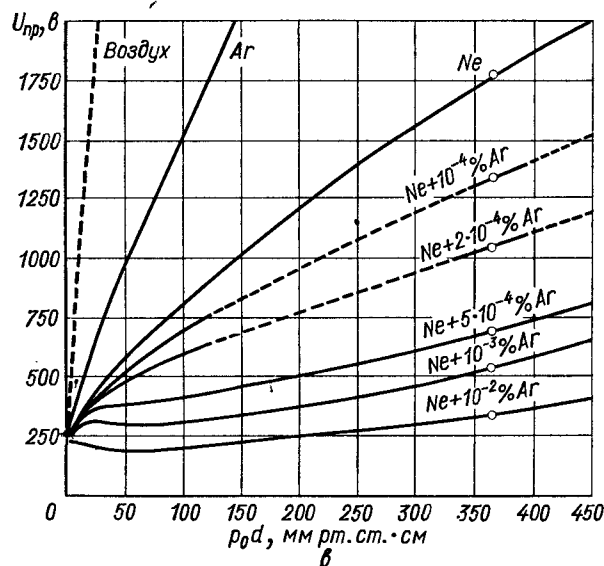
Рис. 23.8. Зависимость напряженности поля в положительном столбе разряда в различных газах и парах от давления. (Ток 0,3 а, радиус трубки 1 см [2].)

Наибольшая напряженность поля тлеющего разряда наблюдается в области темного катодного пространства. Электроны, испущенные катодом, еще не успевают здесь набрать энергию, необходимую для возбуждения и ионизации молекул газа.



Часть площади катода, активно участвующая в разряде, пропорциональна току разряда.

При очень малых токах (обычно меньше 10^{-5} а), когда диаметр катодного пятна меньше ширины катодного пространства, катодное падение потенциала увеличивается из-за радиальной диффузии зарядов (поднормальное катодное падение потенциала). При большой плотности тока, когда уже вся поверхность катода покрыта разрядом, катодное падение потенциала также нарастает (аномальное катодное падение потенциала). На рис. 23.8 даны значения напряженности поля в положительном столбе разряда для различных газов. Даже небольшая примесь электроотрицательного газа приводит к резкому возрастанию напряженности поля положительного столба. Примесь молекулярных газов приводит также к появлению в положительном столбе страт, т. е. расположенных поперек градиента электрического поля темных и светящихся зон. В тлею-

Рис. 23.9. Зависимость пробивного напряжения в различных газах от pd [5]:

а — водород (+ — эксперимент; ○ — расчет, катод никелевый); б — гелий; в — аргон, неон и их смеси (железные электроды, промежутки 2 см), воздух (катод — нержавеющая сталь, $d=13,5$ мм, $T=23^\circ\text{C}$).

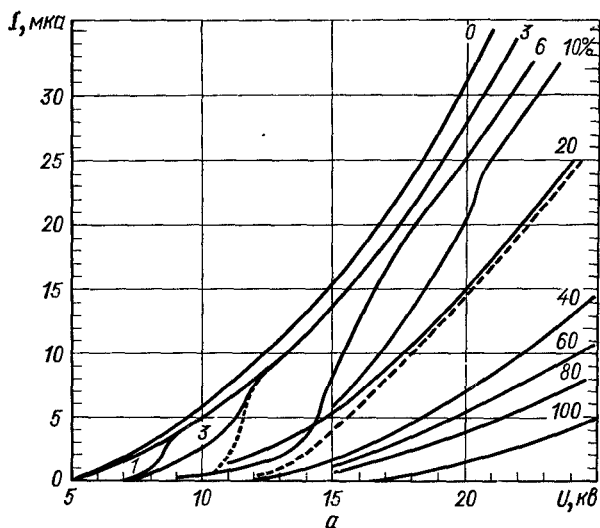


Рис. 23.10. Вольт-амперные характеристики короны для смесей фреона-12 с воздухом. Общее давление — 745 мм рт. ст.:

a — разряд с положительного острого (пунктирные кривые — результат другого эксперимента); b — разряд с отрицательного острого. Ток в заштрихованной области сильно флуктуирует.

щем разряде, происходящем в смеси газов, наблюдается явление *катафореза* — разделения газовой смеси. Газ с меньшим потенциалом ионизации накапливается у катода. Питание люминесцентных ламп, рекламных трубок, работающих на газовых смесях, и т. п. для предотвращения катафореза осуществляется только переменным током.

В большинстве случаев пробивное напряжение в однородном электрическом поле является функцией произведения длины разрядного промежутка d на давле-

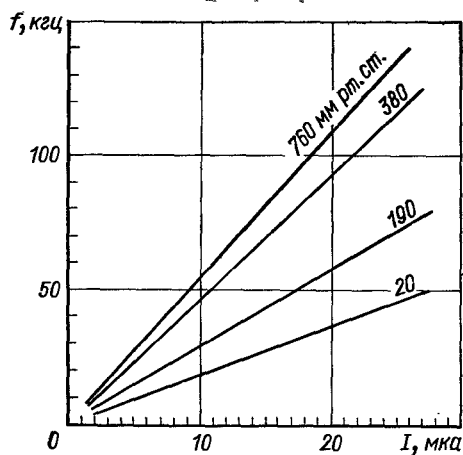


Рис. 23.11. Зависимость частоты импульсов от тока отрицательной короны в воздухе при различных давлениях [5].

ние газа p (рис. 23.9):

$$U_{пр} = f(pd).$$

Эта закономерность известна под названием *закона Пашена*.

На абсолютную величину пробивного напряжения оказывает влияние также материал электродов и такие факторы, как освещение и облучение разрядного промежутка.

Коронный разряд — это особая форма тлеющего разряда в сильно неоднородном электрическом поле. Этот тип разряда достаточно четко выражен лишь при давлении газа от 0,1 до нескольких бар.

Ток коронного разряда имеет характер импульсов, вызываемых электронными лавинами. Частота повторения импульсов 10—100 кГц (рис. 23.10, 23.11).

23.5. ДУГОВОЙ РАЗРЯД

Электрическая дуга — это разряд при большой силе тока (более 1 а) и низком катодном падении потенциала (менее 20 в). Плотность эмиссии электронов с катода дугового разряда достигает значений 10^3 — 10^7 а/см².

У *самостоятельных дуг* эта эмиссия поддерживается тепловыделением самой дуги, у *несамостоятельных* — специальным его нагревом. Проводимость газового канала самостоятельных (термических) дуг обуславливается термической ионизацией газа, причем температуры электронов, ионов и нейтральных частиц в канале приблизительно одинаковы. Разряды низкого давления с подогреваемым активированным катодом* (несамостоятельные дуги) могут, как и в случае тлеющего разряда, иметь температуру электронов, много большую ионной температуры (рис. 23.12—23.15).

* Наиболее распространенное изделие с таким типом разряда — люминесцентная лампа.

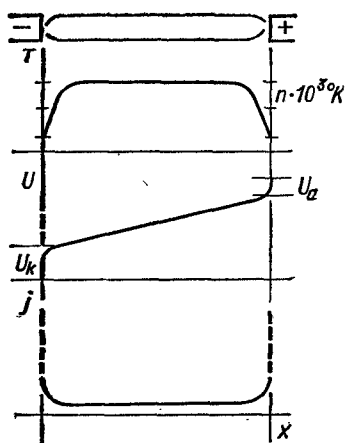


Рис. 23.12. Зависимость температуры газа T , потенциала U и плотности тока j от расстояния x для дуги длиной x ; U_k и U_a — катодное и анодное падение потенциала [2].

Температура столба дуги весьма неоднородна по длине и диаметру, максимум температуры столба у обычных дуг составляет $(4-8) \cdot 10^3$ °K, а у некоторых специальных дуг достигает $5 \cdot 10^4$ °K [6] (рис. 23. 20 и 23.21).

Диаметр свободно горящей дуги уменьшается с ростом давления. При увеличении силы тока диаметр дуги вначале увеличивается, а затем остается неизменным (рис. 23.16). Вольт-амперные характеристики свободно горящих дуг обычно являются падающими для не слишком больших токов (рис. 23.17). При токах в десятки и сотни ампер характеристика может стать возрастающей (рис. 23.18).

На рис. 23.19 показана зависимость катодного падения потенциала от силы тока для аргонной дуги, на рис. 23.20 и 23.21 — распределение температур в столбе дуги с угольными электродами.

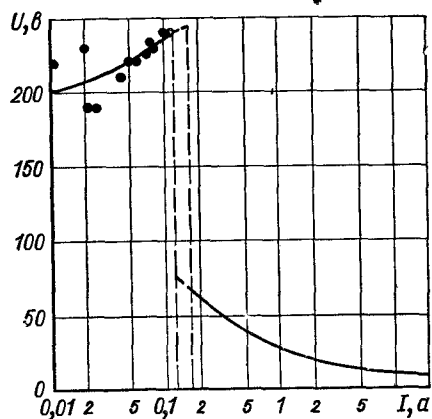
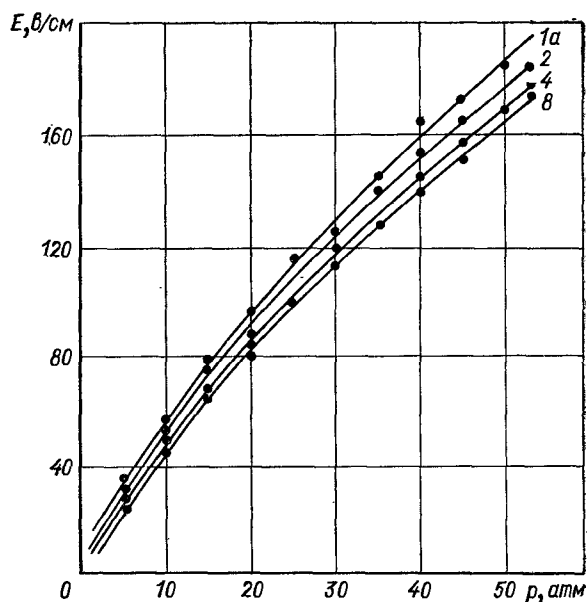


Рис. 23.13. Вольт-амперная характеристика разряда в ксеноновой лампе (5 атм) при режиме, переходном от тлеющего разряда к дуговому [6].



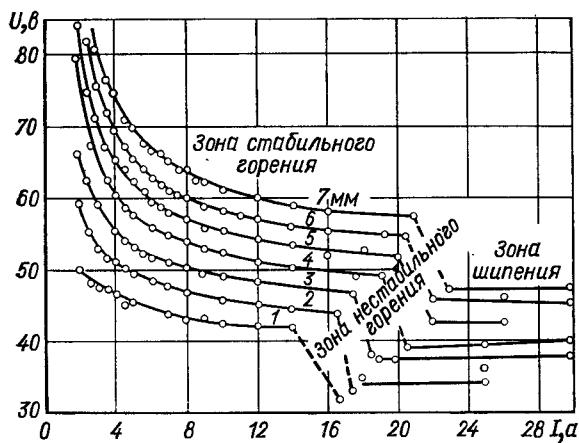


Рис. 23.17. Вольт-амперные характеристики дуг с угольными электродами различной длины с переходной областью от стабильно горящей дуги к «шипящему» разряду [6].

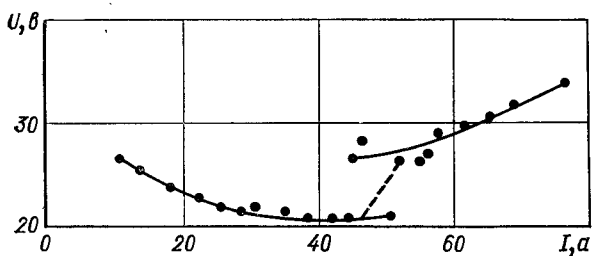


Рис. 23.18. Вольт-амперная характеристика дуги высокой интенсивности с угольными электродами (в том числе при начавшемся выбросе паров из анода) [6].

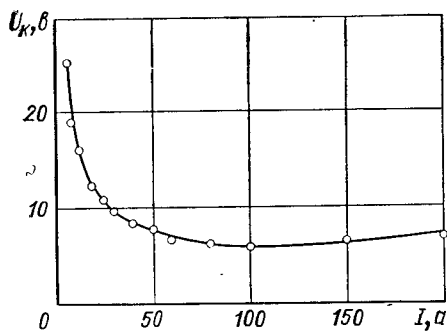


Рис. 23.19. Зависимость катодного падения потенциала от тока в аргонной дуге [6].

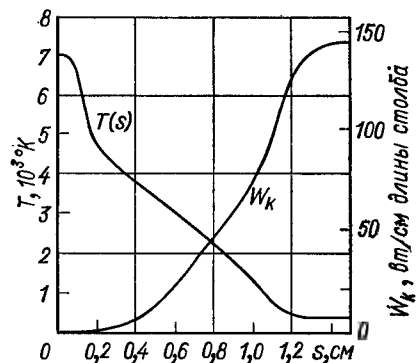


Рис. 23.20. Распределение температуры $T(s)$ в дуге с угольными электродами при $I = 10$ а: Кривая W_k — мощность, отводимая конвекцией; $T(s)$ — расстояние от оси дуги [6].

Таблица 23.6

Характеристика различных электродов для дуги при $p = 1$ атм [2]

Электрод	Газ	Ток дуги, а	$T_k, ^\circ K$	$T_a, ^\circ K$	$\frac{a}{i_a}, \text{см}^2$	U_k, b	U_a, b
C—C	Воздух	1—10	3500	4200	65	9—11	11—12
C—C	N ₂	4—10	3500	4000	70	—	—
Cu—Cu	Воздух	5	2200	2400	—	8—9	2—6
Fe—Fe	»	5	2400	2600	—	8—12	2—6
Ni—Ni	»	5	2400	2400	—	—	—
W—W	»	5	3000	4200	—	—	—
Al—Al	»	5	3400	3400	—	—	—
Al—Al	N ₂	5	2500	2500	—	—	—
Zn—Zn	Воздух	5	3000	3000	—	—	—
Hg—C	Hg	2	600	600	—	7—10	0—10

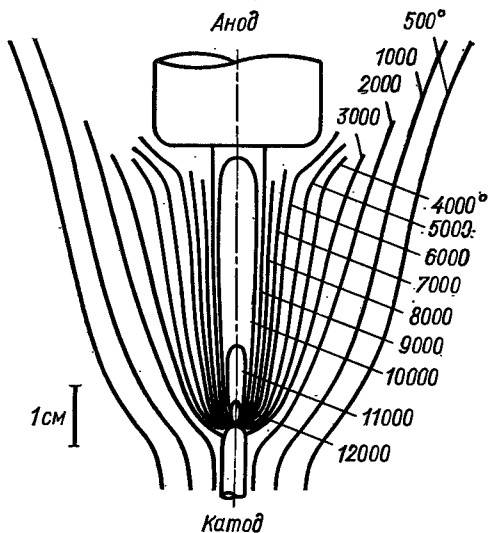


Рис. 23.21. Поле температур в столбе дуги с угольными электродами, горящей в воздухе при $I = 200$ а [6].

23.6. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА

Область состояний, именуемая низкотемпературной плазмой, определена недостаточно четко. Температура такой плазмы обычно ниже $50\,000^\circ\text{K}$, степень ионизации меняется от долей процента до почти 100%. Излуча-

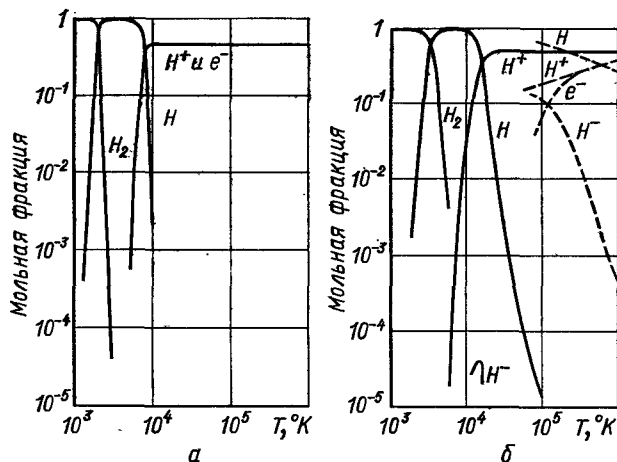


Рис. 23.22. Зависимость состава водородной плазмы от ее температуры [4]:

а — для $p=10^{-6}$ атм; б — для $p=1$ и 10^6 атм (пунктир).

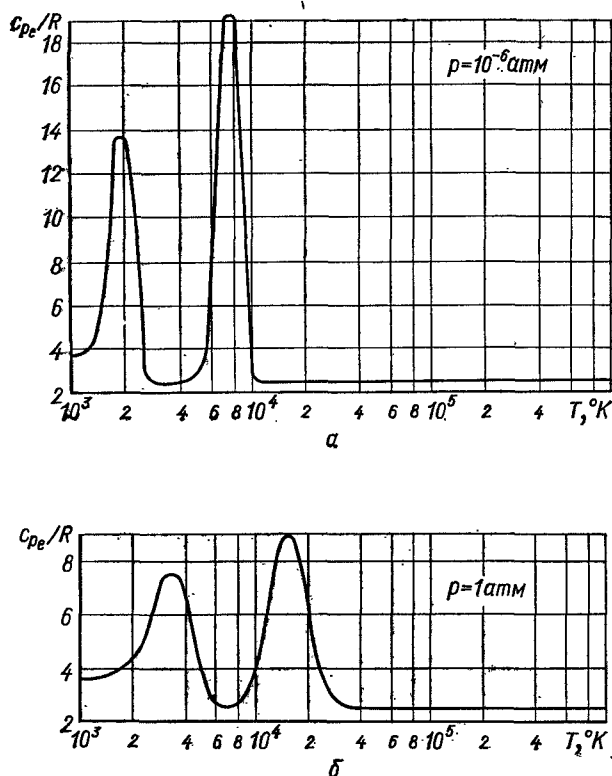


Рис. 23.23. Удельная теплоемкость равновесной водородной плазмы [4]:

а — для $p=10^{-6}$ атм; б — для $p=1$ атм,

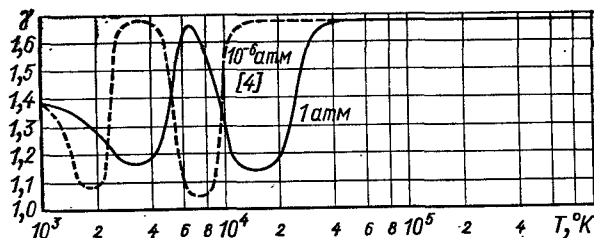


Рис. 23.24. Зависимость отношения удельных теплоемкостей $c_p/c_v = \gamma$ для равновесной водородной плазмы от температуры.

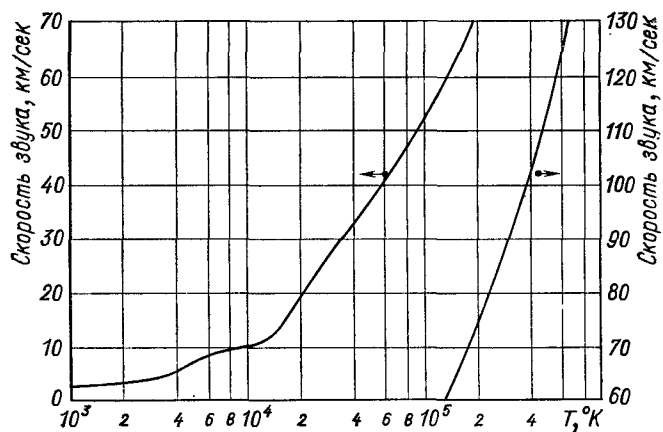


Рис. 23.25. Зависимость скорости звука в равновесной водородной плазме ($p = 1$ атм) от температуры [4].

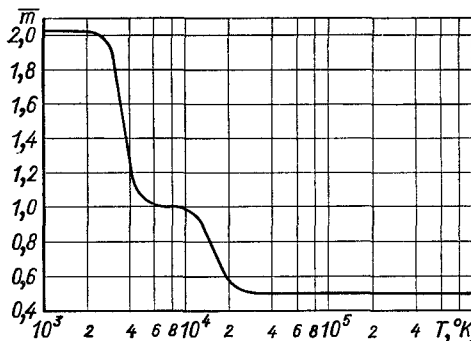


Рис. 23.26. Зависимость средней молекулярной массы водородной плазмы $\bar{m}$ от температуры при $p = 1$ атм [4].

тельная способность плазмы может быть значительной, приближающейся к излучательной способности черного тела. Расчет и изучение низкотемпературной плазмы усложняются из-за многокомпонентности ее состава. Так, плазма H_2 состоит из H_2 , H , H^+ , H^- , e^- .

На рис. 23.22—23.27 приводятся некоторые сведения о свойствах низкотемпературной плазмы. Большинство приводимых данных — расчетные.

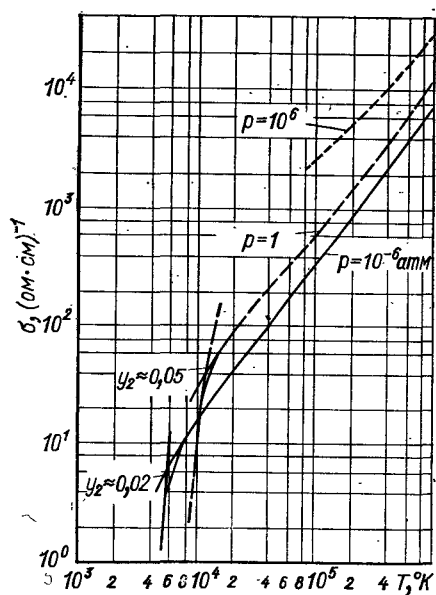


Рис. 23.27. Зависимость проводимости водородной плазмы от температуры [4].

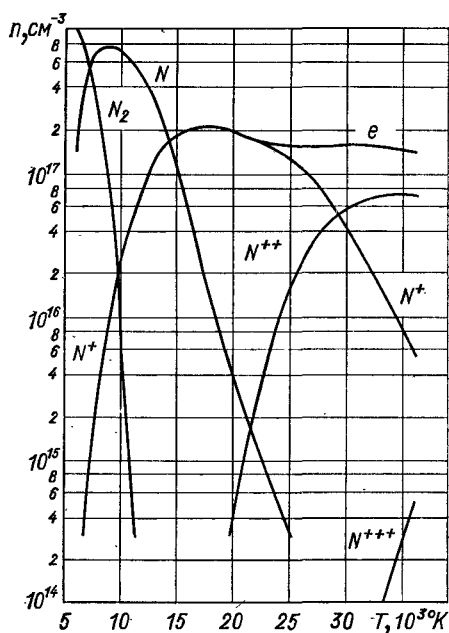


Рис. 23.29. Состав азотной плазмы при атмосферном давлении [6].

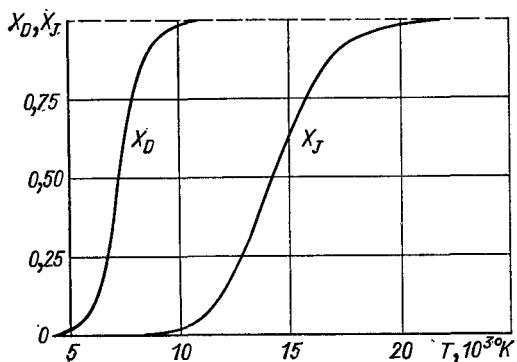


Рис. 23.28. Степень диссоциации X_D и степень ионизации X_I азота при атмосферном давлении [6].

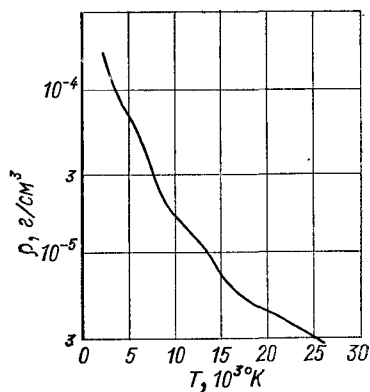


Рис. 23.30. Зависимость плотности азота от температуры при атмосферном давлении [6].

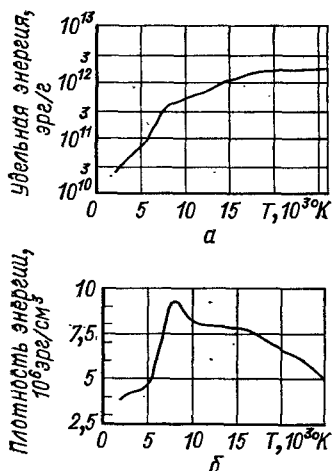


Рис. 23.31. Зависимость удельной энергии (а) и плотности энергии (б) азотной плазмы от температуры [6].

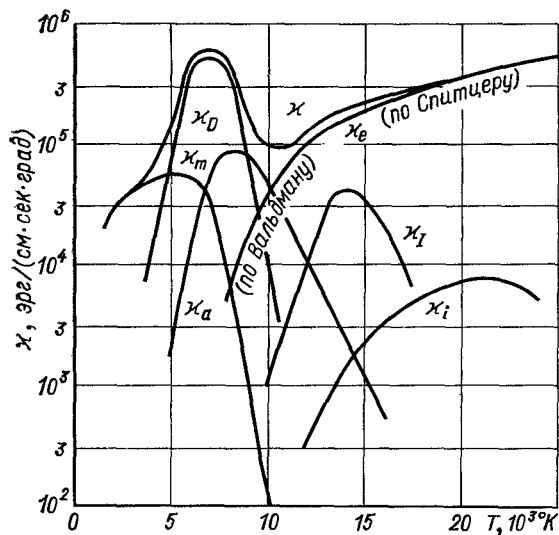


Рис. 23.32. Зависимость теплопроводности молекул κ_m , атомов κ_a , ионов κ_i и электронов κ_e азотной плазмы от температуры. κ_D — теплопроводность вследствие диффузии энергии диссоциации, κ_i — ионизации, κ — сумма всех компонент [6].

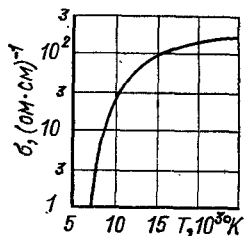


Рис. 23.33. Зависимость проводимости азотной плазмы при атмосферном давлении от температуры [6].

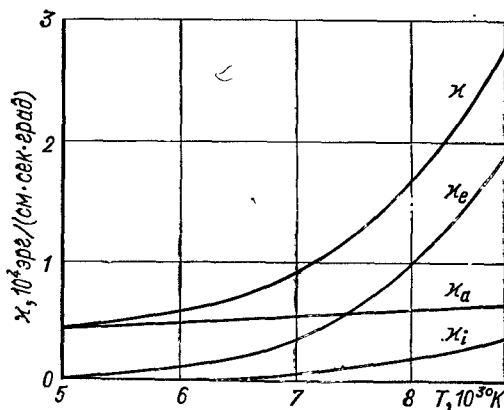


Рис. 23.34. Зависимость теплопроводности ксенона при давлении 25 атм от температуры (обозначения см. на рис. 23.32) [6].

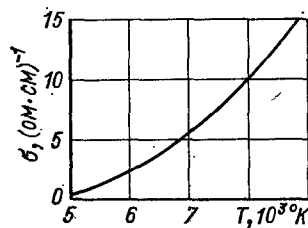


Рис. 23.35. Зависимость проводимости ксенона при $p = 25$ атм от температуры [6].

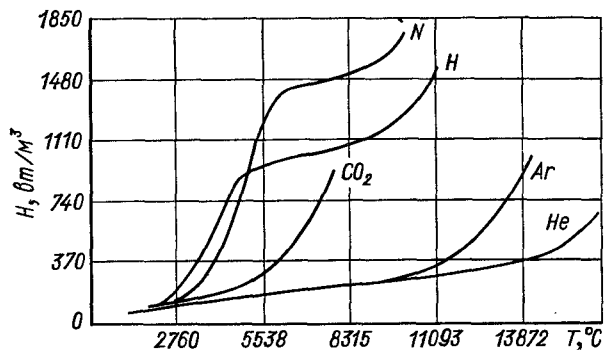


Рис. 23.36. Зависимость энтальпии от температуры для различных газов.

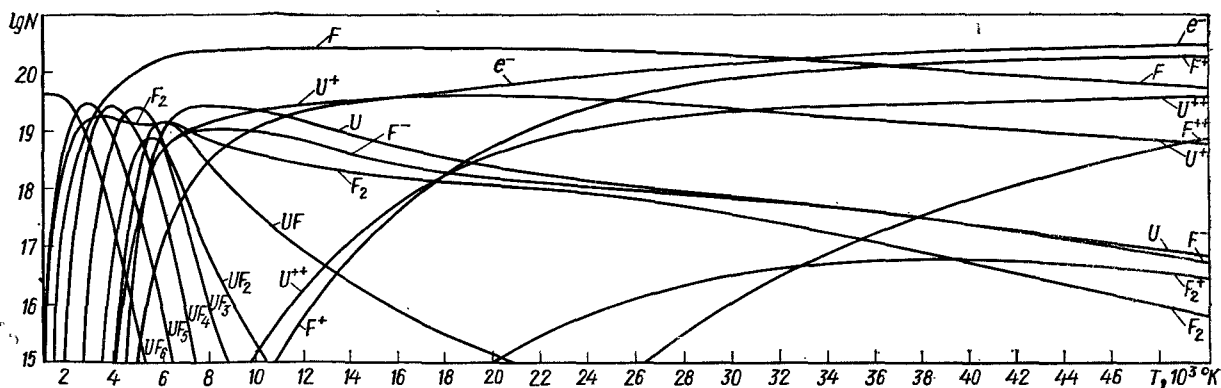


Рис. 23.37. Концентрация различных компонентов в плазме гексафторида урана [7] ($p = 1,6 \text{ ат}$ при $T = 273^\circ \text{К}$).

23.7. ИСКРОВОЙ РАЗРЯД

Искровой разряд начинается с образования стримеров — самораспространяющихся электронных лавин, образующих проводящий канал между электродами. Вторая стадия искрового разряда — главный разряд происходит вдоль канала, образованного стримером, и по своим характеристикам близка к дуговому разряду, ограниченному во времени емкостью электродов и недостаточностью питания.

Пробивное напряжение. Пробивное напряжение в воздухе при 20°С и 760 мм рт. ст. дается приближен-

ной формулой Ритца [5]:

$$U_{\text{пр}} = 24,55d + 6,66\sqrt{d} \text{ кв.}$$

На рис. 23.38 приводится зависимость пробивного напряжения от давления воздуха и расстояния между электродами.

Материал и состояние поверхности электродов не оказывают заметного влияния на пробивное напряжение

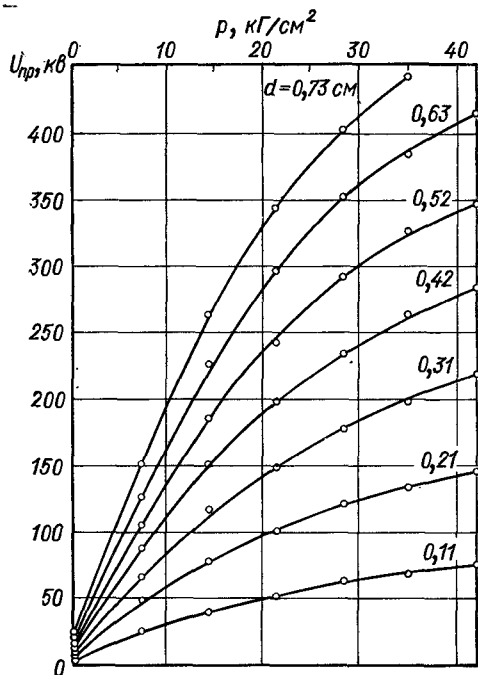


Рис. 23.38. Зависимость пробивного напряжения от давления воздуха и расстояния между плоскими электродами [5].

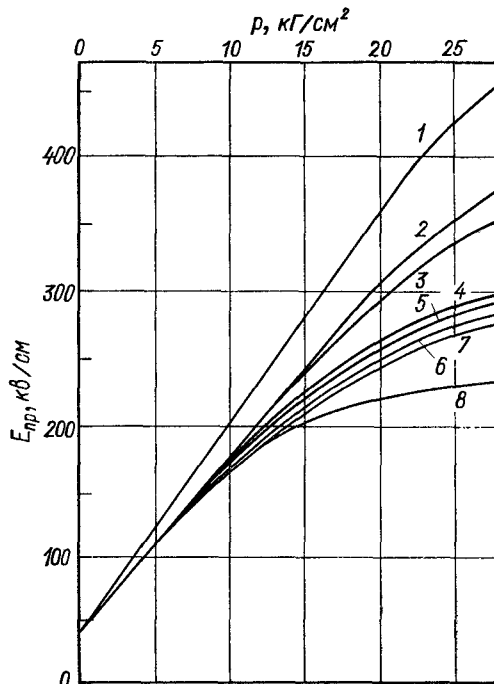


Рис. 23.39. Зависимость градиента пробивной напряженности от давления газа для различных газов и электродов [5]:

1 — воздух + нержавеющая сталь; 2 — CO_2 + нержавеющая сталь; 3 — $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ + нержавеющая сталь; 4 — воздух + Al; 5 — $\text{CO}_2 + \text{Al}$; 6 — N_2 + нержавеющая сталь; 7 — $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{Al}$; 8 — $\text{N}_2 + \text{Al}$.

лишь при давлениях ~ 1 атм. При больших давлениях материал и состояние электродов играют заметную роль (рис. 23.39).

Таблица 23.7

Пробивные напряжения (50 гц, амплитудное значение) для однородного поля в воздухе
($T=20^\circ\text{C}$, $p=760$ мм рт. ст., парциальное давление 10 мм рт. ст.) [5]

d , см	$U_{пр}$, кв	$E_{пр}$, кв/см	d , см	$U_{пр}$, кв	$E_{пр}$, кв/см
0,06	3,13	52,16	0,2	7,90	39,50
0,07	3,49	49,86	0,3	11,02	36,73
0,08	3,84	48,06	0,4	14,01	35,03
0,09	4,18	46,44	0,5	17,00	34,00
0,10	4,54	45,40	0,8	25,70	32,13
0,12	5,23	43,58	1,0	31,35	31,35
0,15	6,25	41,67			

Расстояние между сферическими электродами, соответствующее возникновению искрового пробоя, весьма часто служит для измерения высокого напряжения.

Запаздывание пробоя от момента приложения напряжения изменяется в широких пределах в зависимости от давления и состава газа, материала и конфигурации электродов (рис. 23.42).

Разряд молнии. Разряд молнии имеет, как правило, прерывистый характер, он состоит из отдельных импульсов тока, разделенных промежутками ~ 10 мсек.

Процесс разряда (между облаком и землей) начинается со стримера, распространяющегося ступенями вниз с интервалами между ступенями 15—100 мксек. (В случае молнии стример носит название *ступенчатого лидера*.) Средняя скорость распространения стримера $(1-5)10^7$ см/сек; на отдельных ступенях она составляет $5 \cdot 10^9$ см/сек.

Когда лидер (стример) достигает земли, по нонизо- ванному каналу начинает в обратном направлении (вверх) развиваться главный разряд. Скорость его развития $2 \cdot 10^9 - 1,5 \cdot 10^{10}$ см/сек.

После паузы в несколько сотых долей секунды распространяется второй (стреловидный) лидер со скоростью

Таблица 23.8

Пробивные напряжения между плоскими электродами в воздухе [5]
($T=20^\circ\text{C}$, $p=760$ мм рт. ст.)

d , см	$U_{пр}$, кв	d , см	$U_{пр}$, кв
1	31,35	9	240,0
2	58,7	10	265,0
3	85,8	11	290,0
4	112,0	12	315,5
5	138,5	13	338,1
6	163,8	14	363,2
7	189,9	15	387,7
8	215,0	16	412,6

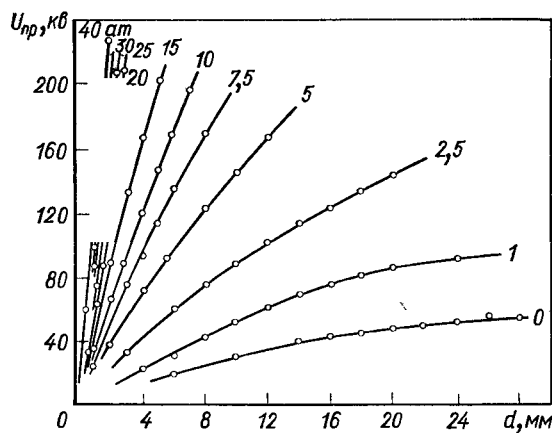


Рис. 23.40. Зависимость пробивного напряжения в воздухе при различных давлениях от длины промежутка шаров ($\varnothing = 50$ мм) — плоскость. Давление — избыточные атмосферы (атм) [5].

Таблица 23.9

Пробивные напряжения (кв) для промежутков между шарами различных диаметров в воздухе [5]
($p=760$ мм рт. ст., $T=20^\circ\text{C}$) (рис. 23.40)

d , см	Диаметр шара, см					
	6,25	12,5	25	50	100	200
1	31,9	31,5	31	—	—	—
1,5	45,9	45,6	45	—	—	—
2	58,2	59,2	59	58	—	—
2,5	69,6	72,0	72	72	71	—
3	79,1	85,2	86	85	84	—
4	94,8	109	112	112	112	—
5	—	129	137	137	137	137
6	—	146	161	164	163	163
8	—	174	205	214	215	215
10	—	—	243	243	266	265
15	—	—	314	372	387	389
20	—	—	—	461	503	510
25	—	—	—	532	611	630
30	—	—	—	591	709	745
35	—	—	—	640	797	858
40	—	—	—	—	876	965
45	—	—	—	—	949	1070
50	—	—	—	—	1010	1180
75	—	—	—	—	1240	1600
100	—	—	—	—	—	1930
150	—	—	—	—	—	2350

Таблица 23.10

Пробивное напряжение различных газов (рис. 23.41)
относительно воздуха
($p=760$ мм рт. ст.) [5]

Газ	Относительное пробивное напряжение	Газ	Относительное пробивное напряжение
CCl_4	6,3	SOF_2	2,5
SeF_6	4,5	CCl_2F_2	2,4—2,5
CCl_3F	3—4,4	SO_2	1,9—2,3
CCl_3H	4,3	$\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$	1,5
$\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$	3,0	$\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$	1,25
$\text{C}_3\text{H}_3\text{I}$	2,9	CF_4	1,1
$\text{C}_2\text{Cl}_2\text{F}_2$	2,8	N_2	1,0
SF_6	2,3—2,5	CO_2	0,9

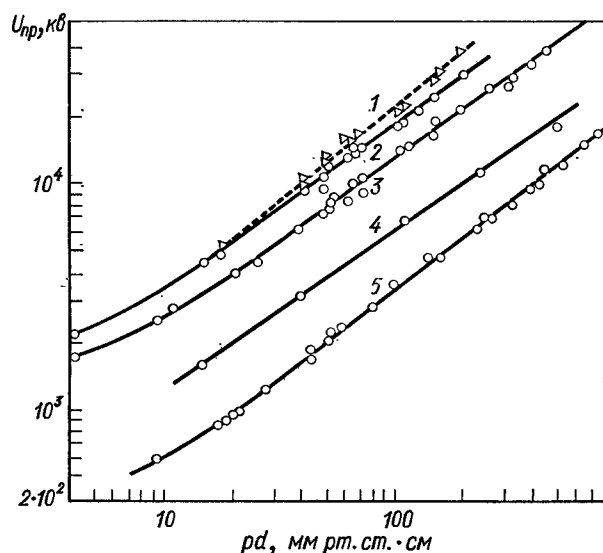


Рис. 23.41. Зависимость пробивного напряжения от pd для различных газов [5]:

1, 2 — CSF_6 ; 3 — фреон-12 (CCl_2F_2); 4 — воздух; 5 — водород.

$\sim 2 \cdot 10^8$ см/сек, а затем новый главный разряд и т. д. (до 40 отдельных разрядов). Обычно последующие разряды происходят по каналу первого разряда. В случае разряда молнии, ударяющей в высокое сооружение, первый ступенчатый лидер может начать движение не от облака, а от земли. Главный разряд в первом импульсе может отсутствовать, замещаясь непрерывно протекающим током. В большинстве разрядов земля является анодом, а атмосфера — катодом (рис. 23.43, 23.44).

Разрядный ток молнии в редких случаях превышает 10^6 а. Обычное его значение $\sim 10^4$ а (рис. 23.45). Характерная осциллограмма тока показана на рис. 23.46. Во многих случаях кроме импульсов тока по каналу разряда протекает и непрерывный ток от десятков до нескольких тысяч ампер. Время нарастания импульса

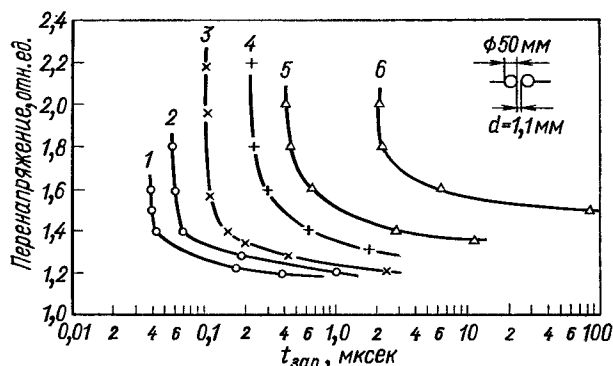


Рис. 23.42. Зависимость среднего статистического времени запаздывания $t_{\text{зап}}$ от перенапряжения при различных материалах электродов [5] ($p = 1$ атм, воздух):

1 — сплав «электрон»; 2 — алюминий; 3 — железо; 4 — серебро; 5 — медь; 6 — оксид меди.

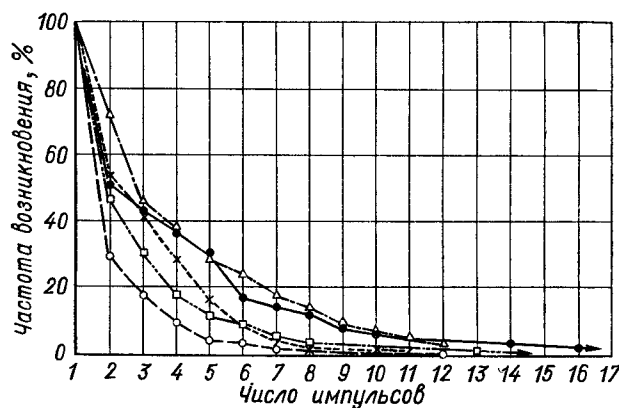


Рис. 23.43. Частота возникновения разрядов молнии с различными числами импульсов (% разрядов, в которых число импульсов меньше указанной величины); кривые получены различными авторами [5].

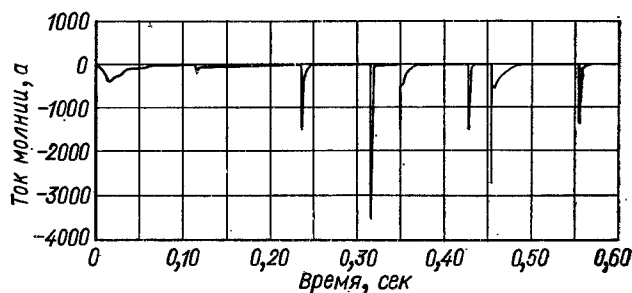


Рис. 23.44. Осциллограмма тока характерного разряда молнии [5].

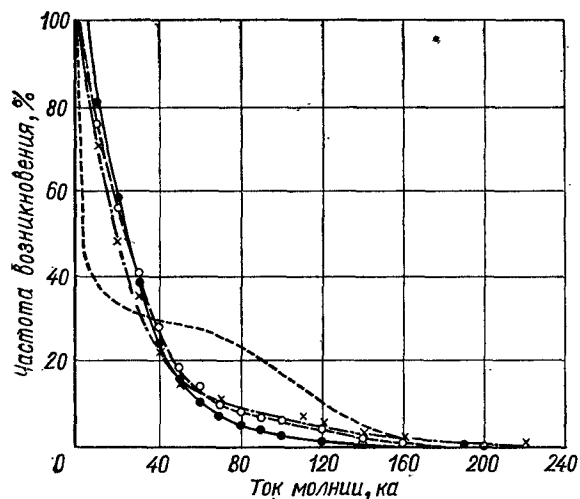


Рис. 23.45. Частота возникновения разрядов молнии с различной величиной максимального тока (далее см. подпись к рис. 23.43) [5].

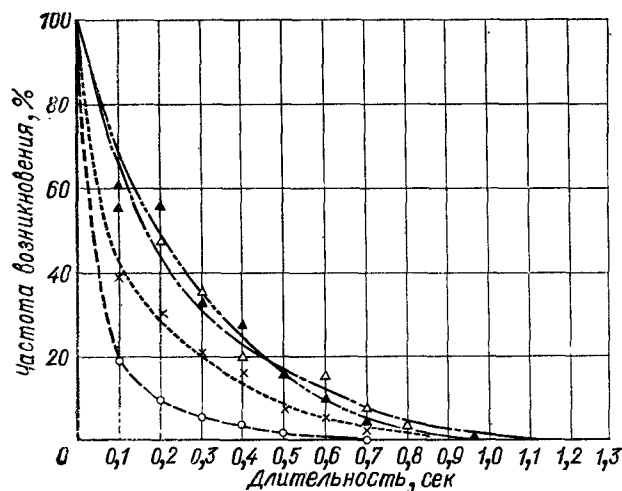


Рис. 23.46. Частота возникновения разрядов молнии различной длительности (см. подпись к рис. 23.43) [5].

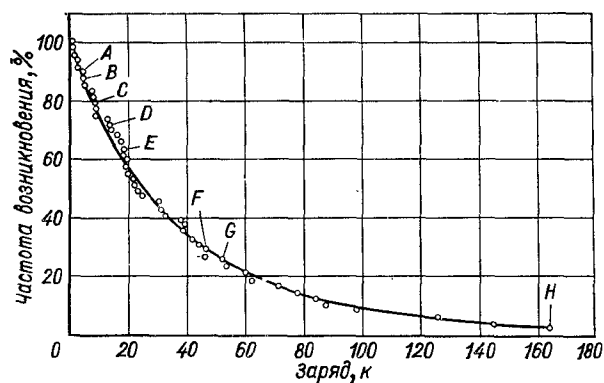


Рис. 23.47. Частота возникновения разрядов молнии с различной величиной общего нейтрализованного заряда (далее см. подпись к рис. 23.43) [5].

тока составляет 1—19 мксек, время спада тока импульса 7—100 мксек.

Заряд, переносимый отдельным импульсом тока, меняется от 0,1 до 5 к (5% импульсов несут более чем по 1,5 к). Суммарный заряд, нейтрализуемый при разряде молнии, может быть более 100 к (рис. 23.47).

23.8. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ РАЗРЯД

Пробивное напряжение (амплитудное значение) при частоте 50 гц практически соответствует пробивному напряжению постоянного тока, а сам разряд на переменном токе низкой частоты является последовательной разверткой во времени тех разрядов, которые существовали бы при данном мгновенном значении тока и напряжения. При повышении частоты эта квазистационарная картина нарушается.

Зависимости пробивного напряжения от частоты, длины разрядного промежутка и давления для различных газов представлены на рис. 23.48—23.52. Рис. 23.50 на примере зависимости пробивного напряжения в водороде от длины волны иллюстрирует эффект падения пробивного напряжения по достижении электронами амплитуды колебаний (с учетом их соударений с молекулами газа), равной разрядному промежутку.

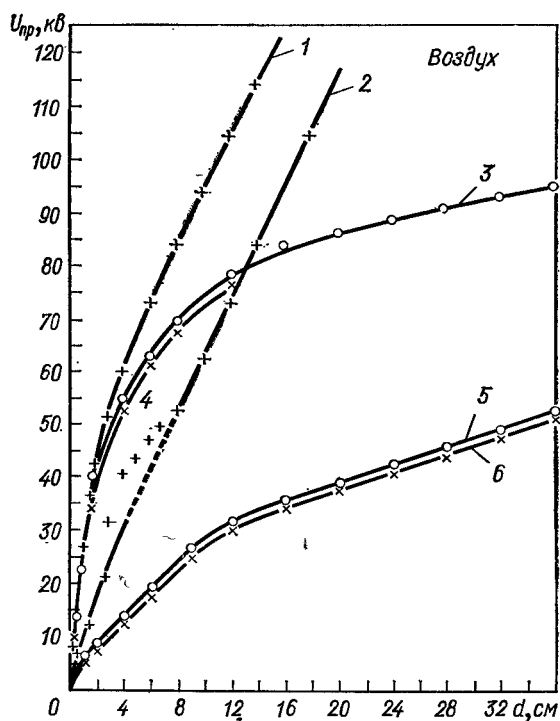


Рис. 23.48. Зависимость пробивного напряжения (воздух, $p = 760$ мм рт. ст.) от длины разрядного промежутка при различных частотах [5]:

1 — плоские электроды, 50 гц; 2 — игольчатые электроды, 50 гц; 3 — плоские электроды, 0,5 Мгц; 4 — плоские электроды, 1 Мгц; 5 — игольчатые электроды, 0,5 Мгц; 6 — игольчатые электроды, 1 Мгц.

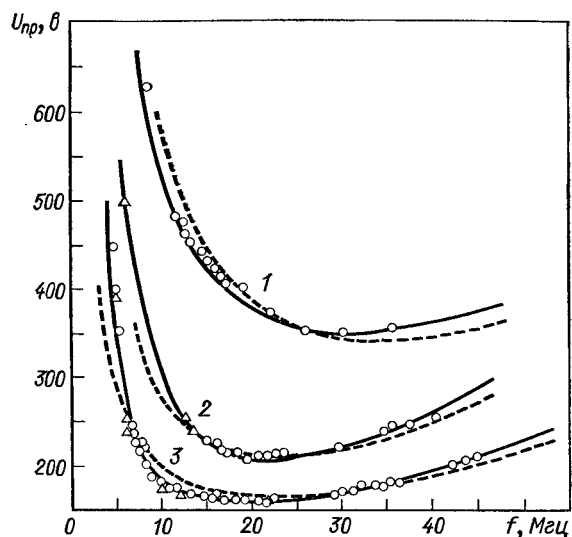


Рис. 23.49. Зависимость пробивного напряжения в аргоне от частоты при различном давлении и длине разрядного промежутка [5]: пунктирные кривые — теория:

1— $p=49 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., $d=10$ см; 2— $p=30 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., $d=10$ см; 3— $p=30 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., $d=5$ см.

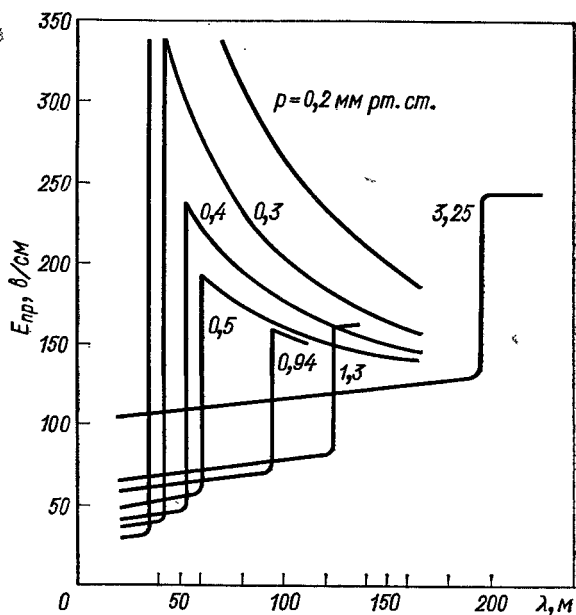


Рис. 23.50. Зависимость пробивной напряженности поля в водороде от длины волны при различных давлениях [5]. Электроды — цилиндрические трубы с плоскими торцами. Зазор — 3,55 см.

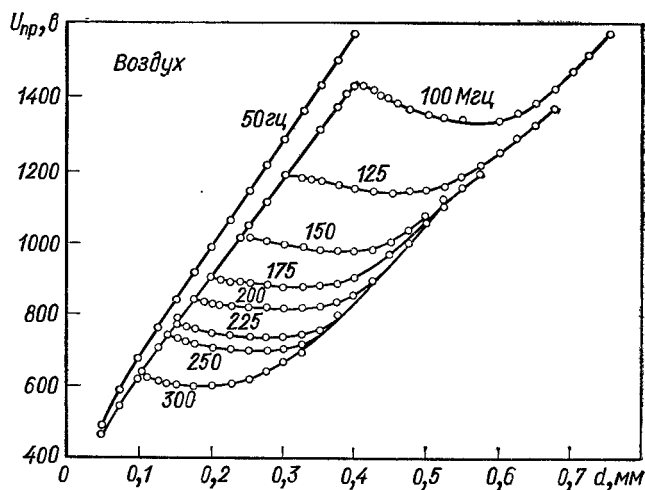


Рис. 23.51. Зависимость пробивного напряжения в воздухе от длины промежутка и частоты. Электроды плоские [5].

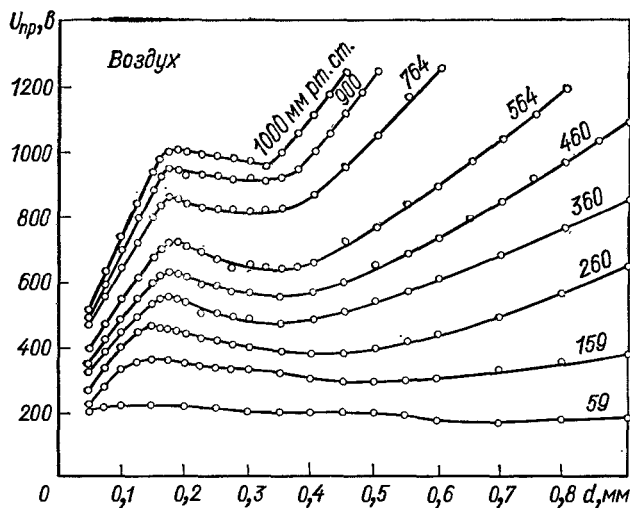


Рис. 23.52. Зависимость пробивного напряжения в воздухе от длины промежутка и давления. Частота 200 МГц, электроды плоские [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капцов Н. А. Электрические явления в газах и вакууме. М.—Л., Гостехиздат, 1950.
2. Энгель А. Ионизованные газы. М., Физматгиз, 1959.
3. Сливков И. Н. и др. Электрический пробой и разряд в вакууме. М., Атомиздат, 1966
4. Ионные, плазменные и дуговые ракетные двигатели. Пер. с англ. М., Госатомиздат, 1961.
5. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
6. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
7. Саложников В. П., Базь А. И. Уравнение состояния гексафторида урана при высоких температурах.— В сб.: Труды Всесоюз. науч.-тех. конф. по теплофизическим свойствам веществ при высоких температурах. М., Стандартгиз, 1967.
8. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда. Пер. с англ. М., Госатомиздат, 1961.

ГЛАВА 24 ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

24.1. ВВЕДЕНИЕ

Электронная эмиссия — испускание электронов телами под влиянием внешних воздействий: нагревания, потока фотонов, электронов, ионов или сильного электрического поля. В зависимости от характера внешнего воздействия различают соответственно термоэлектронную, фотоэлектронную, вторичную электронную, ионно-электронную и автоэлектронную эмиссии. Во всех видах эмиссии, кроме автоэлектронной, роль внешних воздействий сводится к увеличению энергии части электронов или отдельных электронов тела до значения, позволяющего преодолеть потенциальный порог на границе тела, с последующим выходом в вакуум или в другую среду. В случае автоэлектронной эмиссии внешнее электрическое поле превращает потенциальный порог на границе тела в барьер конечной ширины и уменьшает его высоту относительно высоты первоначального порога, вследствие чего становится возможным квантовомеханическое туннелирование электронов сквозь барьер. При этом эмиссия происходит без затраты энергии электрическим полем, чем и обусловлено название этого вида эмиссии.

Тело, испускающее электроны, называется *эмиттером*, или *катодом*.

24.2. РАБОТА ВЫХОДА

Важнейшей эмиссионной характеристикой твердых тел является *работа выхода* $e\phi$ (e — заряд электрона, ϕ — потенциал), равная минимальной энергии, необходимой для перемещения электрона с поверхности Ферми в твердом теле в вакуум (в точку пространства, в которой электрическое поле равно нулю) [1, 2]. Если отсчитывать потенциал от уровня, соответствующего покоящемуся электрону в вакууме, то ϕ — потенциал втуитри кристалла, соответствующий уровню Ферми.

Внешнее электрическое поле уменьшает работу выхода (*эффект Шоттки*). Если поверхность эмиттера однородна, то уменьшение работы выхода при наложении электрического поля напряженностью E (в/см) равно

$$\Delta(e\phi) = (e^3 E)^{1/2} = 3,79 \cdot 10^{-4} E^{1/2} \text{ эв.}$$

Таблица 24.1

Работа выхода для химических элементов-поликристаллов (приведены рекомендуемые значения из работы [2])

Элемент	$e\phi$, эв	Элемент	$e\phi$, эв
Li	2,38	Mo	4,3
Be	3,92	Ru	4,60
B	4,5	Rh	4,75
C	4,7	Pd	4,8
Na	2,35	Ag	4,3
Mg	3,64	Cd	4,1
Al	4,25	In	3,8
Si	4,8	Sn	4,38
K	2,22	Sb	4,08
Ca	2,80	Te	4,73
Sc	3,3	Cs	1,81
Ti	3,95	Ba	2,49
V	4,12	La	3,3
Cr	4,58	Ce	2,7
Mn	3,83	Hf	3,53
Fe	4,31	Ta	4,12
Co	4,41	W	4,54
Ni	4,50	Re	5,0
Cu	4,40	Os	4,7
Zn	4,24	Ir	4,7
Ga	3,96	Pt	5,32
Ge	4,76	Au	4,30
As	4,72	Hg	4,52
Se	4,72	Tl	3,7
Rb	2,16	Pb	4,0
Sr	2,35	Bi	4,4
Y	3,3	Th	3,30
Zr	3,9	U	3,3
Nb	3,99		

Таблица 24.2

Работа выхода для химических элементов на полнокристаллических подложках, покрытых оптимальным слоем адсорбата [2]

Адсорбент — адсорбат	$e \varphi, \text{эВ}$	Адсорбент — адсорбат	$e \varphi, \text{эВ}$
Be—Cs	1,94	Pt—O	6,55
C—Cs	1,37	Pt—Na	2,10
Ti—Cs	1,32	Pt—K	1,62
Cr—Cs	1,71	Pt—Rb	1,57
Fe—Cs	1,82	Pt—Cs	1,38
Ni—Cs	1,37	Pt—Ba	1,9
Cu—Cs	1,64	Pt—Ba	3,28
Cu—Ba	3,35	Au—O	6,46
Ge—Ba	2,2	Au—O	5,66
Zr—Cs	3,93	Au—Ba	2,3
Mo—Cs	1,54	Au—Ba	3,35
Mo—Th	2,58	W—O—Na	1,72
Ag—Ba	1,56	W—O—K	1,76
Hf—Cs	3,62	Сталь	1,41
Ta—Cs	1,1	1X1869T—Cs	1,52
Ta—Cs	1,6	Сталь 304—Cs	1,52
W—Li	2,18	Ag ₂ O—Cs	0,75
W—O	6,20	NbC—Cs	1,2
W—Ba	1,75	ZrC—Cs	1,60
W—La	2,2	Mo ₂ C—Cs	1,45
W—Th	2,63	Ta ₂ C—Cs	1,4
Re—Cs	1,45	MoSi ₂ —Cs	1,75
Re—Ba	2,3	TaSi ₂ —Cs	1,47
Re—Th	2,58	WSi ₂ —Cs	1,47

Таблица 24.3

Работа выхода соединений на подложках [2].
Слой активирован прогревом

Адсорбент — адсорбат	$e \varphi, \text{эВ}$	Адсорбент — адсорбат	$e \varphi, \text{эВ}$
Al—BaO	1,80	Ag—BaO	1,32
Ti—BaO	1,58	Ta—BaO	1,58
Cr—BaO	1,72	W—BaO	1,34
Fe—BaO	1,61	W—ThO ₂	2,5
Ni—BaO	1,35	Pt—BaO	1,71
Mo—BaO	1,39	Au—BaO	1,90
Mo—ThO ₂	2,9	LaB ₆ —BaO	2,27—2,07

24.3. ТЕРМОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Плотность тока насыщения термоэлектронной эмиссии j_s эмиттера с однородной поверхностью при слабом внешнем электрическом поле, не влияющем на работу выхода, определяется уравнением Ричардсона — Дешмана [3]:

$$j_s = AT^2 \exp(-e\varphi_0/kT),$$

где $A \approx A_0(1 - \bar{R}_e)$, $e\varphi_0$ — эффективная работа выхода эмиттера; $\bar{R}_e$ — коэффициент отражения элект-

ронов от потенциального барьера, усредненный по энергиям электронов; $A_0 = 4\pi me^2 k^2 / h^3 = 120,4 \text{ а/(см}^2 \times \text{град}^2)$ — универсальная постоянная; k — постоянная Больцмана.

Термоэмиссионный катод (термокатод) — элемент электровакуумного прибора, являющийся источником электронов. Основные типы термоэмиссионных катодов: металлические, оксидный, металлопористый и боридный.

Металлические термокатоды, изготавливаемые из торированного вольфрама и торированного карбидированного вольфрама, в настоящее время находят лишь ограниченное применение.

Оксидный термокатод — смесь окислов металлов, нанесенная на металлический керн. В низкотемпературных катодах, работающих в интервале температур от 900 до 1300° К, используются смеси окислов щелочноземельных металлов — бария, кальция и стронция. Эти окислы получают при разложении карбонатов щелочноземельных металлов, нанесенных на металлический керн катода, в процессе его прогрева непосредственно в вакуумном приборе, в котором катод должен работать. Оксидные низкотемпературные катоды наиболее широко используются в электровакуумных приборах. В высокотемпературных оксидных катодах, работающих в интервале температур от 1400 до 1900° К, используются окислы иттрия и тория. Такие термокатоды применяются главным образом в магнетронах.

Металлопористый вольфрамо-бариевый термокатод — пористая вольфрамовая губка, внешняя поверхность которой покрыта пленкой бария, снижающей работу выхода и обеспечивающей получение большого тока термоэмиссии. В процессе работы пленка бария разрушается вследствие испарения, ионной бомбардировки и под воздействием газов, выделяющихся из деталей приборов. Возобновление пленки происходит при поступлении бария из вольфрамовой губки, освобождающегося при разложении содержащегося в ней активного вещества. Существует несколько типов металлопористых вольфрамо-бариевых термокатодов: *камерные*, или *L-катоды* (состоят из камеры, заполненной активным веществом — карбонатом бария-стронция — и закрытой стенкой — губкой, наружная сторона которой является эмиттирующей поверхностью); *пропитанные* и *прессованные* (представляют собой пористую губку из тугоплавкого металла — вольфрама, рения или молибдена, — поры которой заполнены активным веществом — алюминатом или вольфраматом бария-кальция. Металлопористые вольфрамо-бариевые термокатоды широко используются в вакуумных СВЧ-приборах); *керамо-металлические*, или *керметкатоды* (представляют собой пористую вольфрамовую губку, заполненную активным веществом, окисью тория или металлическим торием. Катоды этого типа работают при температуре 1650—2000° К и предназначены для использования главным образом в магнетронах).

Боридный термокатод — катод на основе металлоподобных соединений типа MeB₆, где Me — щелочноземельные и редкоземельные металлы или торий. В качестве термокатода наиболее широко применяется гексаборид лантана, реже — гексабориды иттрия и гадолиния и диборид хрома. Термоэмиссионные катоды из гексаборида лантана работают при температуре 1650° К и обеспечивают получение плотности термоэмиссионных токов до 40—50 а/см² в режиме пространственного заряда, а при большой напряженности электрического поля у поверхности катода — до 200 а/см². Высокая механическая прочность и устойчивость таких катодов к ионной бомбардировке позволяет использовать их в режиме автоэлектронной эмиссии (при напряженностях внешнего электрического поля $> 10^6 \text{ в/см}$ значительная часть эмиссионного тока обусловлена туннелированием

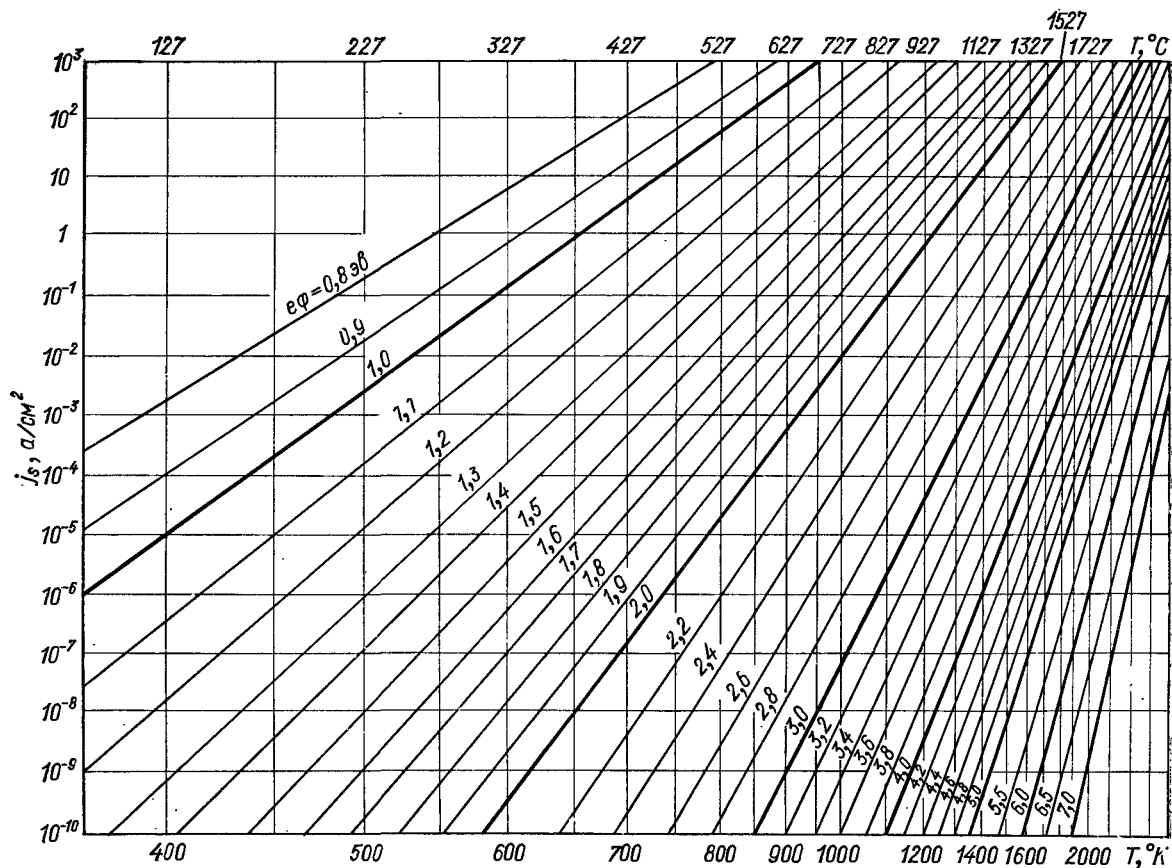


Рис. 24.1. Зависимости тока термоэлектронной эмиссии от температуры и работы выхода катода [10].

электронов сквозь барьер). В этом режиме катод из гексаборида лантана при температуре 1400—1500° К может давать плотность термоэмиссионного тока до 1000 а/см². Катоды из гексаборида лантана не отравляются на воздухе и устойчиво работают в относительно плохом вакууме. Срок их службы не зависит от давления остаточных газов в приборе вплоть до давлений $\sim 10^{-4}$ мм рт. ст. Эти катоды используются в ускорителях и в различных вакуумных устройствах.

Основные характеристики термоэмиссионных катодов: работа выхода $e\phi$, рабочая температура T ; плотность термоэмиссионного тока j_s и ее зависимость от температуры; скорость испарения активного вещества при рабочей температуре $v_{\text{исп}}$; эффективность катода η —

отношение плотности термоэмиссионного тока к мощности, затрачиваемой на нагревание катода, критерий качества катода — отношение работы выхода к теплоте испарения или отношение плотности термоэмиссионного тока к скорости испарения активного вещества при данной температуре.

Свойства терموкатодов

В табл. 24.4—24.6, 24.10 используются обозначения: d — толщина слоя, испаряющегося за 1 ч, $d_{\text{кр}}$ — критическая толщина слоя [10], $v_{\text{исп}}$ — скорость испарения катода.

Термоэмиссионные свойства вольфрамового термокатада [10]
 Чистый вольфрам; $\rho=19,3 \text{ г/см}^3$; работа выхода $e\phi=4,54 \text{ эВ}$

$T, ^\circ\text{K}$	$I_s, \text{ а/см}^2$	$v_{\text{исп}}^*, \text{ г/(см}^2 \cdot \text{сек)}$	$I_s/v_{\text{исп}}^*, \text{ кг/г}$	$d, \text{ мм}$	Срок службы, ч		
					$\phi=0,1 \text{ мм}; d_{\text{кр}} \sim 3 \text{ мкм}$	$\phi=1 \text{ мм}; d_{\text{кр}} \sim 39 \text{ мкм}$	Массивный катод $d_{\text{кр}} \sim 150 \text{ мкм}$
2100	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-13}$	$2,0 \cdot 10^{10}$	$3,7 \cdot 10^{-10}$	$8 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^8$
2200	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-12}$	$6,2 \cdot 10^9$	$3,9 \cdot 10^{-9}$	$8 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^7$
2300	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-11}$	$2,3 \cdot 10^9$	$3,3 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^6$
2400	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$9,3 \cdot 10^8$	$2,4 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$
2500	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$7,6 \cdot 10^{-10}$	$4,0 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	2150	$2 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$
2600	$7,0 \cdot 10^{-1}$	$3,9 \cdot 10^{-9}$	$1,8 \cdot 10^8$	$7,3 \cdot 10^{-6}$	410	4100	$2 \cdot 10^4$
2700	1,6	$1,8 \cdot 10^{-8}$	$9,0 \cdot 10^7$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	90	900	4500
2800	3,5	$7,4 \cdot 10^{-8}$	$4,7 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	21	210	1080
2900	7,3	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^7$	$5,2 \cdot 10^{-4}$	5,8	58	290
3000	14,0	$9,5 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^7$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	1,7	17	84

Оксидный термокатод

Таблица 24.6

Таблица 24.5

Термоэмиссионные свойства BaO—SrO-оксидного термокатада [10]

Средняя плотность $\rho=5,5 \text{ г/см}^3$; работа выхода $e\phi=1,6 \text{ эВ}$; толщина активного слоя 20 мкм (10 мг/см^2);
 kern никелевый; $d_{\text{кр}}=6 \text{ мкм}$

$T, ^\circ\text{K}$	$I_s^*, \text{ а/см}^2$	$v_{\text{исп}}^*, \text{ г/(см}^2 \cdot \text{сек)}$	$I_s/v_{\text{исп}}^*, \text{ кг/г}$	$d^*, \text{ мм}$	Срок службы*, ч
500	10^{-5}	—	—	—	—
600	$4 \cdot 10^{-4}$	—	—	—	—
700	$7 \cdot 10^{-3}$	—	—	—	—
800	$4 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	—
900	0,4	—	—	—	—
1000	3,0	$5 \cdot 10^{-11}$	$6 \cdot 10^{10}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	5000(2·101)
1100	12	$2 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^9$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	115 (460)
1200	50	$8 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^8$	$5,2 \cdot 10^{-4}$	3 (11)
1300	200	$1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^8$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	0,23 (0,92)

Термоэмиссионные свойства металлопористого вольфрамо-бариевого термокатада (L-катод) [10]
 Работа выхода $e\phi=1,8 \div 2,0 \text{ эВ}$; количество BaO 30 мг/см^2

$T, ^\circ\text{K}$	$I_s^*, \text{ а/см}^2$	$v_{\text{исп}}^*, \text{ г/(см}^2 \cdot \text{сек)}$	$I_s/v_{\text{исп}}^*, \text{ кг/г}$	$d, \text{ мм}$	Срок службы*, ч
800	$1 \cdot 10^{-7}$	—	—	—	—
900	$3 \cdot 10^{-4}$	—	—	—	—
1000	$5 \cdot 10^{-3}$	—	—	—	—
1100	$6 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	—
1200	0,4	—	—	—	—
1300	2	$1,7 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^4$
1400	10	$2 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^9$	$7 \cdot 10^{-3}$	4300
1500	30	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^9$	$6 \cdot 10^{-2}$	500
1600	90	$1 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^8$	0,4	75
1700	300	$5,5 \cdot 10^{-7}$	$5,5 \cdot 10^8$	2	15

* Значения для BaO. Для BaO—SrO-термокатодов скорость испарения несколько меньше.

* Срок службы определяется запасом активного вещества; данные приведены для стандартного катода [10].

Таблица 24.7

Термоэмиссионные характеристики и срок службы прессованных металлопористых оксидно-никелевых катодов [3]

$T, ^\circ\text{K}$	$i_s, \text{a/cm}^2$	Срок службы, ч	Режим отбора тока
1200	0,5	5000	Стационарный
1220	0,5	5000	»
1270	1	5000	»
1340	3	3000	»
1250	10	600	Импульсный

Таблица 24.8

Термоэмиссионные свойства керамо-металлических термокатодов различного состава [3]

Катод (состав, %)	$T, ^\circ\text{C}$	$i_s, \text{a/cm}^2$	
		Импульсный режим	Стационарный режим
$\text{ThH}_2 + \text{W}_2\text{C} + \text{W}$ (0,5+10+89,5)	1700	—	—
$\text{W} + \text{ThO}_2$ (96+4)	1500	0,8	—
	1600	2,0	—
$\text{W} + \text{ThO}_2 + \text{B}$ (95+4+1)	1370	—	0,4
$\text{W} + \text{ThO}_2 + \text{B}$ (97,5+2+0,5)	1370	—	0,4
$\text{W} + \text{La}_2\text{O}_3$ (70+30)	1300	—	1,4
$\text{W} + \text{Nd}_2\text{O}_3$ (70+30)	1300	—	0,5
$\text{W} + \text{Gd}_2\text{O}_3$ (70+30)	1400	—	0,4
$\text{W} + \left[\frac{3}{4} \text{Gd}_2\text{O}_3 + \frac{1}{4} \text{La}_2\text{O}_3 \right]$ (70+30)	1400	—	0,86
$\text{W} + \text{Th}$ (преспитанный)	1600	—	2—3

Таблица 24.9

Термоэмиссионные константы боридов [3]

$$\varphi_T = \varphi_0 + \frac{\partial \varphi}{\partial T} T$$

Соединение	$\varphi_0, \text{эВ}$	$\frac{\partial \varphi}{\partial T}, \text{эВ/град}$	Коэффициент вторичной эмиссии σ	Соединение	$\varphi_0, \text{эВ}$	$\frac{\partial \varphi}{\partial T}, \text{эВ/град}$	Коэффициент вторичной эмиссии σ
ScB_6	2,96	2,3	0,58	NdB_6	3,97	1,6	0,8
TiB_6	3,88	—	0,82	EuB_6	4,9	—	—
VB_6	3,95	—	0,8	GdB_6	2,05	4,0	0,8
CrB_2	3,36	—	0,77	TbB_6	3,26	—	—
MnB_2	4,14	—	—	DyB_6	3,53	1,5	0,8
SrB_6	2,67	2,5	—	HoB_6	3,42	1,6	0,7
YB_6	2,22	2,18	1,0	ErB_6	3,37	2,3	—
ZrB_2	3,67	2,0	0,85	$\text{TmB}_6 + \text{TmB}_4$	3,38	—	—
BaB_6	3,45	7,5	—	YbB_6	3,13	3,0	—
LaB_6	2,68	1,4	0,95	LuB_6	3,0	1,6	0,8
CeB_6	2,59	2,3	0,68	ThB_6	2,92	2,0	—
PrB_6	3,46	2,5	0,8				

Таблица 24.10

Термоэмиссионные свойства гексаборида лантана LaB_6 [10]. Плотность $\rho = 2,61 \text{ г/см}^3$; работа выхода $\varphi = 2,68 \text{ эВ}$

$T, ^\circ\text{K}$	$i_s, \text{a/cm}^2$	$v_{\text{исп}}, \text{г/(см}^2 \cdot \text{сек)}$	$i_s/v_{\text{исп}}, \text{к/г}$	$d, \text{мм}$	Срок службы катода с косвенным подогревом, ч	
					Точечный монокристаллический, $d_{\text{кр}} \sim 3 \text{ мм}$	Массивный, $d_{\text{кр}} \sim 100 \text{ мм}$
1600	0,4	$1 \cdot 10^{-11}$	$4,0 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^5$
1700	1,0	$1 \cdot 10^{-10}$	$1,0 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	2150	$7 \cdot 10^4$
1800	3,0	$1 \cdot 10^{-9}$	$3,0 \cdot 10^9$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	215	$7 \cdot 10^3$
1900	8,5	$9 \cdot 10^{-9}$	$9,5 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	25	800
2000	25	$7 \cdot 10^{-8}$	$3,6 \cdot 10^8$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	3	100
2100	100	$6 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^8$	$8,3 \cdot 10^{-3}$	0,35	12
2200	400	$4 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^8$	$5,55 \cdot 10^{-2}$	0,05	1,8

Сравнительные характеристики различных термокатодов

Таблица 24.11

Работа выхода φ , теплота испарения q и критерий качества φ/q современных термокатодов [3]

Тип катода	$\varphi, \text{эВ}$	$q, \text{эВ}$	φ/q	Рабочая температура ($^\circ\text{K}$) при долговечности	
				10 000 ч	1000 ч
Вольфрамовый	4,54	8,0	0,57	2300*	2500*
Танталовый	4,2	7,9	0,53	2000*	2200*
Ториевооксидный	3,2	7,6	0,42	1770	1870
Боридный	2,8	6,8	0,41	1720	1870
Вольфрам-бариевый	2,1	4,7	0,45	1300	1420
Оксидный	1,6	4,0	0,4	1030	1100

* Значения ориентировочные, так как долговечность катодов прямого накала зависит также от диаметра катода.

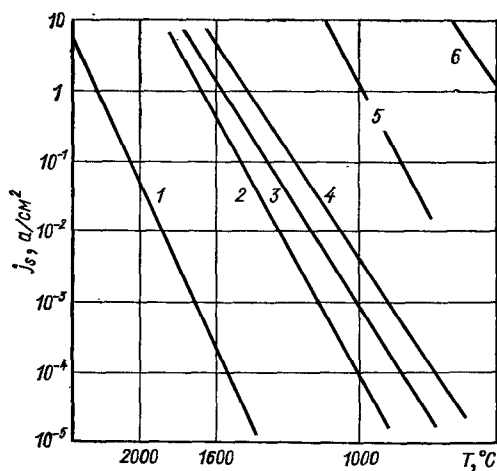


Рис. 24.2. Зависимость тока термоэлектронной эмиссии от температуры для различных катодов [3]:

1 — вольфрам; 2 — торированный вольфрам; 3 — окись тория; 4 — гексаборид лантана; 5 — L-катод; 6 — оксидный.

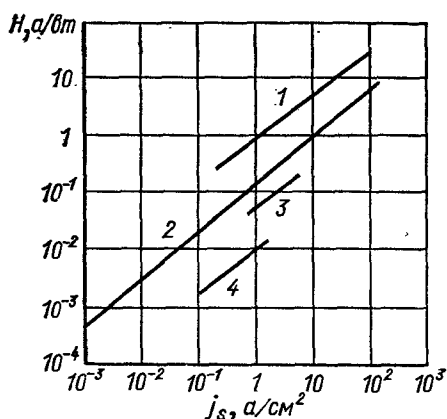


Рис. 24.3. Зависимость эффективности (расчетной) от плотности тока эмиссии для катодов различных типов [3]:

1 — оксидный; 2 — L-катод; 3 — оксидно-ториевый; 4 — вольфрамовый.

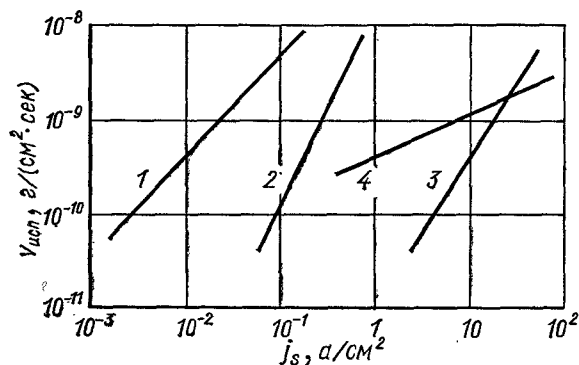


Рис. 24.4. Зависимость скорости испарения от плотности тока эмиссии для различных материалов [3]:

1 — вольфрам; 2 — торированный вольфрам; 3 — импрегнированный катод; 4 — гексаборид лантана.

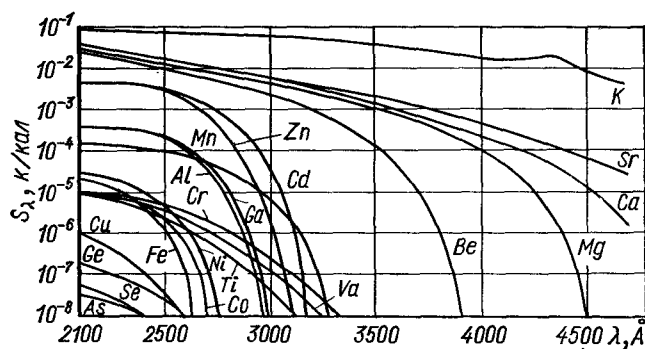


Рис. 24.5. Спектральная чувствительность металлов в ультрафиолетовом диапазоне [5]. Плохообезгаженные поверхности.

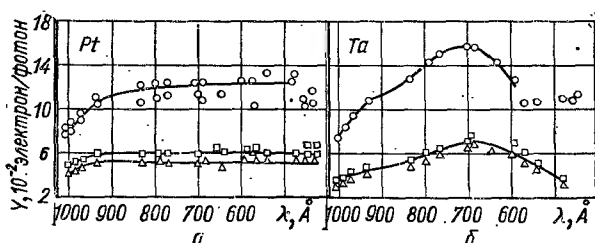


Рис. 24.6. Спектральные характеристики платины (а) и тантала (б) в вакуумном ультрафиолетовом диапазоне [14]:

○, △ — необезгаженные и обезгаженные металлы, □ — после пребывания на воздухе в течение 17 ч.

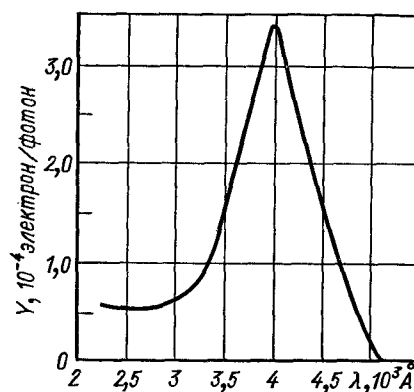


Рис. 24.7. Спектральная характеристика квантового выхода фотоэмиссии калия [6].

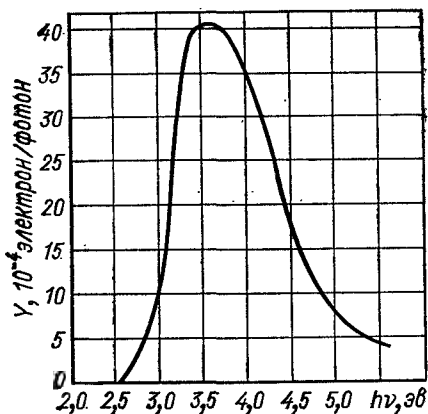


Рис. 24.8. Спектральная характеристика квантового выхода фотоэмиссии натрия [6].

24.4. ФОТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Основные законы фотоэлектронной эмиссии (ФЭ) [1, 4—6]. 1. Величина фототока насыщения пропорциональна потоку фотонов, падающих на поверхность тела:

$$I = eYF/h\nu,$$

где F — интенсивность излучения в энергетических единицах, Y — квантовый выход (электрон/фотон) — число эмиттированных электронов на каждый фотон, падающий на поверхность фотоэмиттера.

2. Для каждого вещества при $T = 0$ существует минимальная (пороговая) частота излучения ν_0 , способного вызвать ФЭ; $\lambda_0 = c/\nu_0$ — «красная граница» ФЭ; $h\nu_0$ — пороговая энергия, или фотоэлектрическая работа выхода.

3. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности излучения и линейно связана с его частотой: $(mv^2/2)_{\max} = h(\nu - \nu_0)$. Пороговая частота ФЭ ν_0 строго определена только при $T = 0$. При $T > 0$ ФЭ наблюдается вблизи порога и при частотах $\nu < \nu_0$. ФЭ из металлических фотокатодов при частотах излучения, не очень далеких от пороговой частоты ($\nu < 1,5\nu_0$), хорошо описывается феноменологической теорией Фаулера [1], согласно которой

$$I = \alpha A_0 T^2 \exp\left(-\frac{h\nu_0 - h\nu}{kT}\right), \quad \nu < \nu_0;$$

$$I = \alpha \frac{A_0}{2} \left[\frac{h^2}{k^2} (\nu - \nu_0)^2 + \frac{\pi^2}{3} T^2 \right], \quad \nu > \nu_0,$$

где α — отношение плотности возбужденных светом электронов вблизи поверхности эмиттера к плотности нормального электронного газа в эмиттере ($\alpha \sim F/h\nu$), $A_0 = 4\pi emk^2/h^3$ — постоянная Ричардсона. Пороговая энергия ФЭ $h\nu_0$ в металлах совпадает с термоэлектронной работой выхода $e\phi$. В полупроводниках спектральная зависимость квантового выхода ФЭ вблизи порога ФЭ имеет вид:

$$Y \sim (h\nu - h\nu_0)^m,$$

где $m = 3/2$ для непрямых оптических переходов, $m = 1$ или $m = 2$ для прямых оптических переходов и выхода электронов из полупроводника соответственно без рассеяния и при упругом рассеянии. ФЭ из полупроводника может быть обусловлена оптическим возбуждением электронов из зоны проводимости (в вырожденных полупроводниках n -типа), с уровней примесей или дефектов или из валентной зоны. Для каждого из этих случаев $h\nu_0$ имеет свое значение. Обычно, если иное не оговорено, под фотоэлектрической работой выхода понимают минимальную энергию фотонов, при которой начинается ФЭ из валентной зоны полупроводника. Это значение может совпадать с термоэлектронной работой выхода $e\phi$ полупроводника или быть больше нее. Специальной обработкой поверхности цезием и кислородом у некоторых полупроводников p -типа (Si, GaAs, твердые растворы GaAs — GaSb, GaAs — InAs, InAs — InP) удается снизить сродство к электрону, (т. е. разность энергий покоящегося электрона в вакууме и на дне зоны проводимости в полупроводнике) до нуля или даже сделать его отрицательным. При этом фотоэлектрическая работа выхода становится равной ширине запрещенной зоны полупроводника, а квантовый выход ФЭ резко возрастает, так как выходить из полупроводника в вакуум могут электроны, переведенные излучением из валентной зоны в зону проводимости и имеющие в ней практически нулевую энергию.

Основные типы фотоэмиссионных катодов. Металлические фотокатоды (используются для регистрации коротковолнового ультрафиолетового излучения с длинами волн $\lambda < 2000 \text{ \AA}$); *сурьмяно-щелочные* SbCs₃, SbBi, SbKNaCs (используются для регистрации ближнего ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного излучений $2000 \text{ \AA} < \lambda < 9000 \text{ \AA}$); *кислородно-серебряно-цезиевый* фотокатод (используется для регистрации длинноволновой части видимого и инфракрасного излучений с длинами волн до $\lambda \approx 1,4 \text{ мкм}$); *фотокатоды с отрицательным сродством* к электрону на основе монокристаллических кремния или полупроводников типа A^{III} B^V и их твердых растворов или тонких пленок этих материалов со сниженной работой выхода (используются главным образом для регистрации ближнего инфракрасного излучения).

Основные характеристики фотокатодов. *Квантовый*

$$\text{выход } Y \left(\frac{\text{электрон}}{\text{фотон}} \right) = \frac{I/e}{F_\nu / h\nu} \text{ — число вышедших в ваку-}$$

ум фотоэлектронов, приходящихся на каждый падающий на поверхность фотокатода фотон

$$\begin{aligned} \text{Спектральная чувствительность } S_\lambda \left(\frac{a}{\text{вт}} \right) &= \\ &= \frac{\lambda \text{ (см)}}{1,236 \cdot 10^{-4}} Y \text{ — фототок насыщения на единицу мощ-} \\ &\text{ности падающего на фотокатод монохроматического из-} \\ &\text{лучения.} \end{aligned}$$

Спектральная характеристика — зависимость S_λ или Y от частоты или длины волны излучения.

Интегральная чувствительность S — отношение фототока насыщения к интенсивности потока излучения стандартного источника света, за который обычно принимают вольфрамовую лампу накаливания с температурой нити 2850° K :

$$S = \frac{\int_0^\infty S_\lambda F_\lambda d\lambda}{F_\lambda d\lambda} a/em,$$

$$S = \frac{\int_0^{\infty} S_{\lambda} F_{\lambda} d\lambda}{683 \int_0^{\infty} F_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda} a / \text{лм},$$

где K_{λ} — относительная спектральная чувствительность «нормального» человеческого глаза $K_{\lambda_{\text{макс}}} = K_{\lambda=0,555 \text{ мкм}} = 683 \text{ лм/вт}$.

Плотность темнового тока i_T — плотность тока термоэмиссии необлучаемого фотокатода при рабочей температуре. Темновой ток является основным источником шума в фотоэлектронных приборах при регистрации слабых потоков излучения. Среднеквадратический ток шума в отсутствие излучения дается формулой Найквиста:

$$(\overline{i_{\text{ш}}^2})^{1/2} = (4kTi_T s \Delta f)^{1/2},$$

где s — площадь фотокатода, Δf — ширина полосы частот регистрирующего устройства.

Таблица 24.12

Длина волны фотоэлектрического порога чистых металлов [5]

Металл	$\lambda_0, \text{Å}$	Металл	$\lambda_0, \text{Å}$	Металл	$\lambda_0, \text{Å}$
Церий	4800	Титан	3150	Хром	2840
Кальций	3850	Тантал	3080	Вольфрам	2700
Торий	3650	Кадмий	2920		
Уран	3400	Висмут	2870	Железо	2680
Магний	3350	Молибден	2850	Никель	2550
Цирконий	3300			Платина	2000

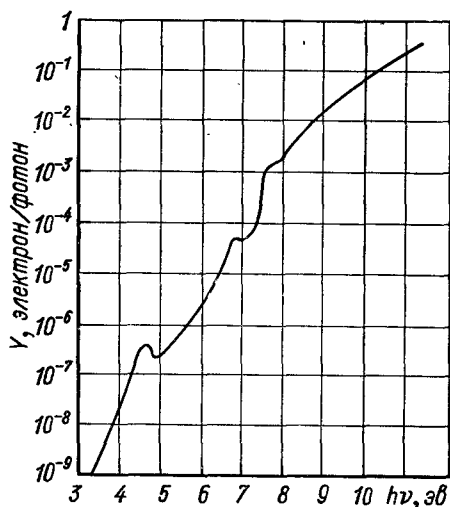


Рис. 24.9. Спектральная характеристика квантового выхода фотоэмиссии MgO [6].

Таблица 24.13

Ширина запрещенной зоны E_g , сродство к электрону χ и порог фотоэмиссии $h\nu_0$ различных полупроводниковых материалов [6]

Материал	Химическая формула	$E_g, \text{эВ}$	$\chi, \text{эВ}$	$h\nu_0, \text{эВ}$
Бария окись	BaO	3,7	1,3	5
Бария титанат	BaTiO ₃	2,7	2,6	5,3
Висмута теллурид	Bi ₂ Te ₃	0,1	5,2	5,3
Галлия антимонид	GaSb	0,7	4,1	4,8
Галлия арсенид	GaAs	1,4	4,1	5,5
Германий	Ge	0,7	4,2	4,9
Индия антимонид	InSb	0,2	4,6	4,8
Индия арсенид	InAs	0,4	4,9	5,3
Индия фосфид	InP	1,3	4,4	5,7
Кадмия селенид	CdSe	3	4	7
Кадмия сульфид	CdS	2,4	3,8—4,8	6,2—7,2
Кадмия теллурид	CdTe	1,5	4,4	5,9
Калия иодид	KI	6,2	1,1	7,3
Кремний	Si	1,1	4	5,1
Кремния карбид (кубич.) (гекс.)	SiC	2,2	4,8	7
Лития иодид	LiI	2,9	4,1	7
Лития фторид	LiF	5,9	1,4	7,3
Магния антимонид	Mg ₃ Sb ₂	12	1	13
Магния окись	MgO	0,8	3,0	3,8
Меди иодид	CuI	8,7	1	<10
Натрия иодид	NaI	3	3	6
Ртут селенид	HgSe	5,8	1,5	7,3
Ртут теллурид	HgTe	0,7	4,4	5,1
Рубидия иодид	RbI	0,5	4	4,5
Рубидия теллурид	Rb ₂ Te	6,1	1,2	7,3
Свинца сульфид	PbS	3,3	<0,5	3,7
Свинца теллурид	PbTe	0,4	<4,2	<4,6
Селен	Se	0,3	4,7	5
Серебра бромид	AgBr	2,3	3,7	6
Серебра хлорид	AgCl	2,5	3,5	6
Теллур	Te	3	3	6
Цезия аурит	CsAu	0,3	4,6	4,9
Цезия иодид	CsI	2,6	1,4	4
Цезия теллурид	Cs ₂ Te	>6	<0,5	6,4
		3,3	<0,5	3,5

Свойства фотокатодов

Таблица 24.14

Ширина запрещенной зоны E_g и сродство к электрону χ для щелочных галогенидов

Соединение	$E_g, \text{эВ}$	$\chi, \text{эВ}$	Соединение	$E_g, \text{эВ}$	$\chi, \text{эВ}$
CsI	6,3	0,1	NaI	5,8	1,5
KI	6,2	1,1	RbI	6,1	1,2
LiI	5,9	1,4			

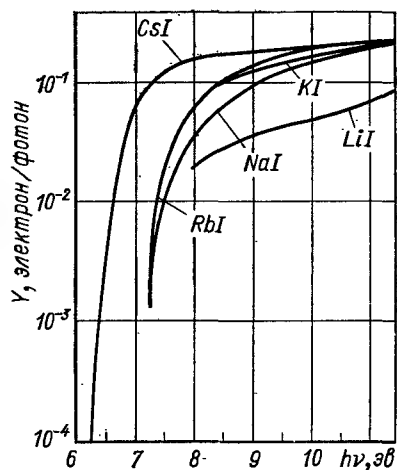
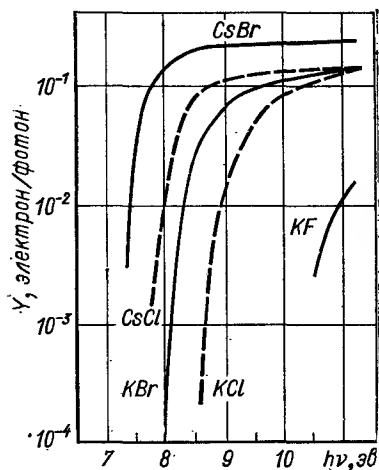


Рис. 24.10. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии щелочных галогенидов [6].

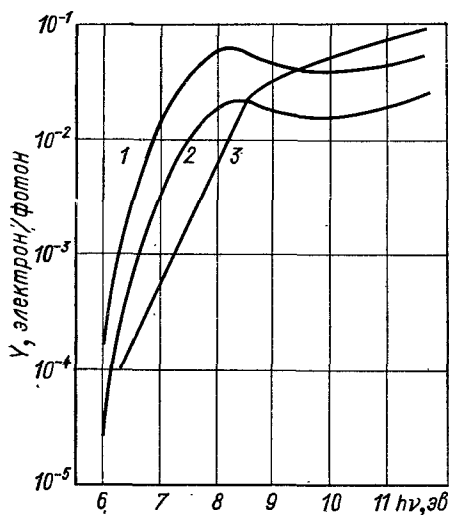


Рис. 24.11. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии галогенидов серебра [6]:

1 — монокристаллический AgBr; 2 — плавный AgBr; 3 — AgCl.

Рис. 24.12. Пропускание сколотых кристаллов LiF до (1) и после (2) экспозиции на воздухе [6].

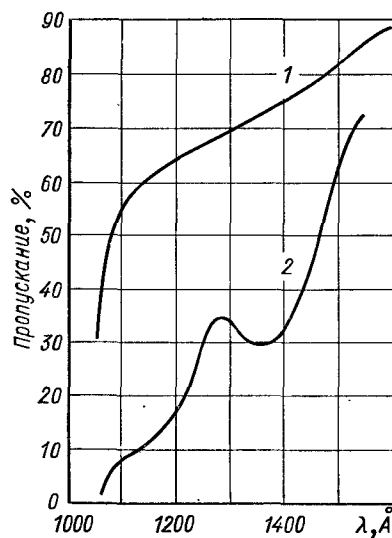


Таблица 24.15

Основные свойства фотокатодов на основе щелочных антимонидов [6]

Обозначения: $Y_{\text{макс}}$ — максимальный квантовый выход; $S_{\text{макс}}$ — максимальная чувствительность; λ — длина волны, соответствующая чувствительности в 1 % $Y_{\text{макс}}$; χ — сродство к электрону; n — электронная, p — дырочная проводимости; i_s — плотность термоэмиссионного тока при комнатной температуре

Фотокатод	Тип кристаллической решетки	$Y_{\text{макс}}$ электрон/фотон	λ_0 , Å	$S_{\text{макс}}$ мкА/лм	E_g , эВ	χ , эВ	Тип проводимости	i_s , а/см ²
K ₃ Sb	куб.	0,07	5500	12	1,4	0,9	p	—
K ₃ Sb	гекс.	0,07	4600	2	1,1	1,6	n	—
K ₂ CsSb	куб.	0,30	6600	100	1,0	1,1	p	10 ⁻¹⁷
K ₂ CsSb(O)	»	0,35	7800	130	1,0	1,1	p	10 ⁻¹⁶
Na ₃ Sb	гекс.	0,02	3300	?	1,1	2,44	n	—
Na ₂ KSb	куб.	0,30	6000	60	1,0	1,0	p	10 ⁻¹⁶
Rb ₃ Sb	»	0,10	5800	25	1,0	1,2	p	—
Cs ₃ Sb	»	0,15	5800	25	1,6	0,45	p	10 ⁻¹⁶
C ₃ Sb на MgO	»	0,20	6500	80	1,6	0,45	p	10 ⁻¹⁵
(Cs)Na ₂ KSb	»	0,30	8700	300	1,0	0,55	p	10 ⁻¹⁶

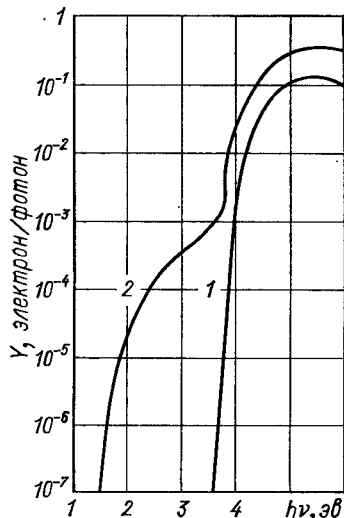


Рис. 24.13. Спектральная характеристика квантового выхода фотоэмиссии Cs_2Te -фотокаатода [6]:
1 — без избытка Cs; 2 — с избытком Cs.

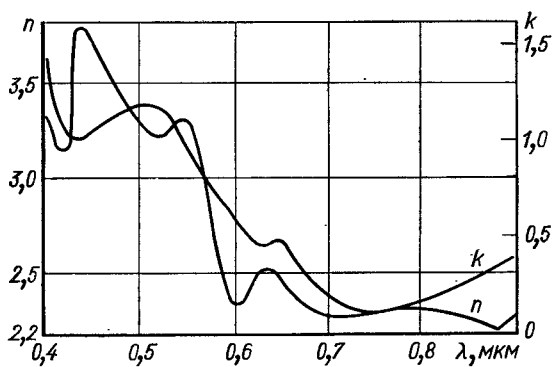


Рис. 24.14. Спектральная зависимость показателей преломления (n) и поглощения (k) Cs_3Sb [4].

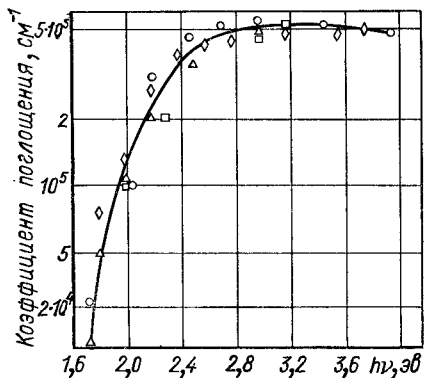


Рис. 24.15. Спектральная характеристика коэффициента поглощения Cs_3Sb [6]. Точки — данные различных авторов.

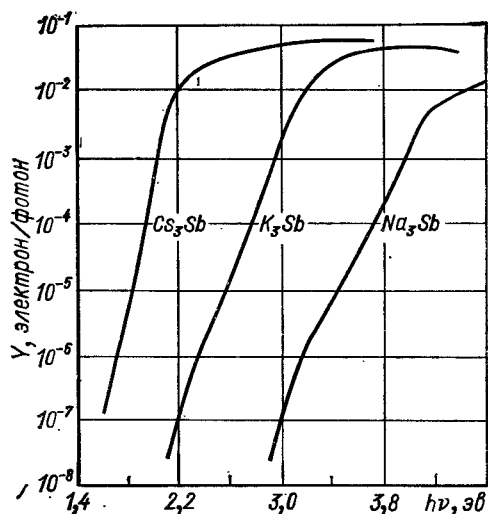


Рис. 24.16. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии сурьмяно-щелочных фотокаатодов [6].

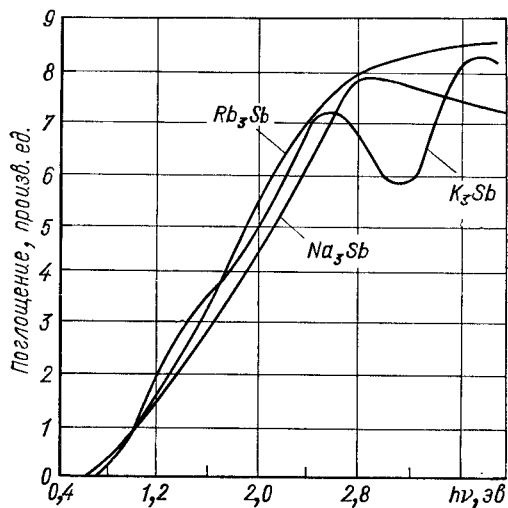


Рис. 24.17. Спектральные зависимости оптического поглощения Na_3Sb , K_3Sb (гекс.) и Rb_3Sb [6].

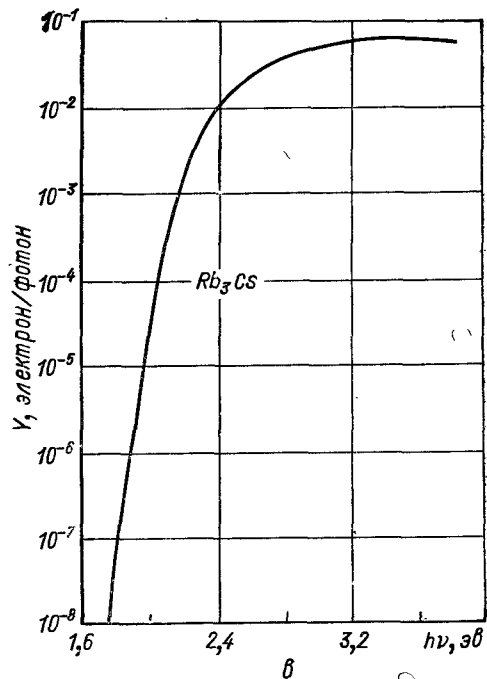
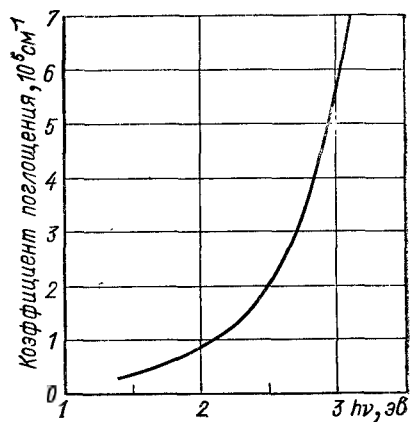
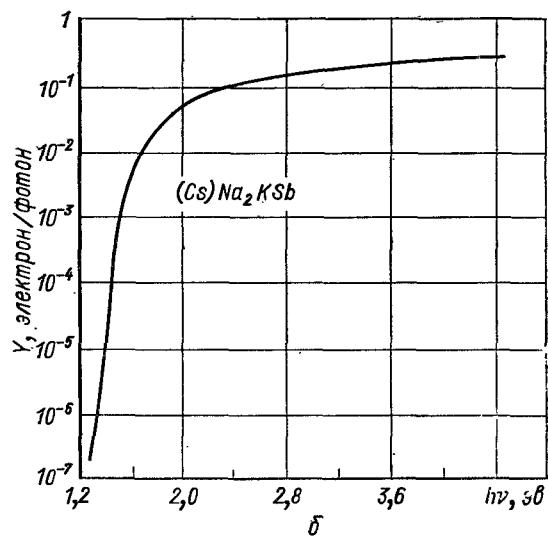
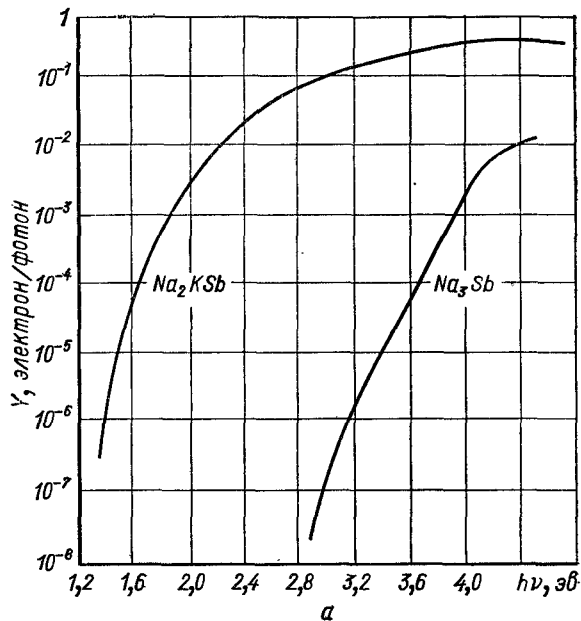


Рис. 24.18. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии сурьмяно-щелочных фотокатодов [6]:
 а — Na_2KSb и Na_3Sb ; б — $(\text{Cs})\text{Na}_2\text{KSb}$; в — Rb_3Cs .

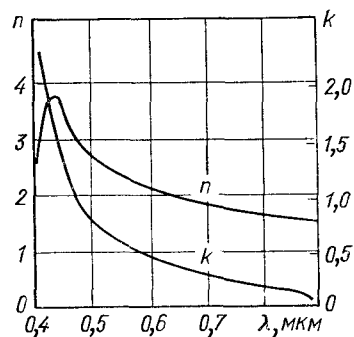


Рис. 24.20. Спектральные зависимости показателей преломления (n) и поглощения (k) $(\text{Cs})\text{Na}_2\text{KSb}$ -фотокатода [4].

Рис. 24.19. Спектральная зависимость коэффициента оптического поглощения $(\text{Cs})\text{Na}_2\text{KSb}$ [6].

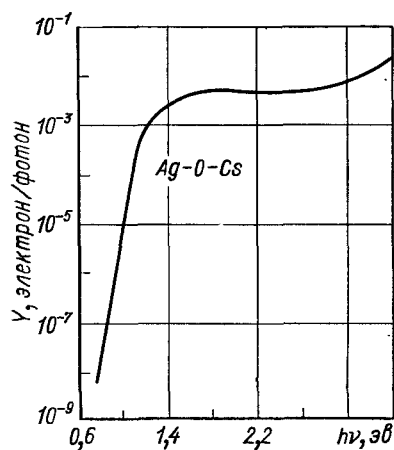


Рис. 24.21. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии Ag-O-Cs- и висмута-цезиевых фотокатодов [6].

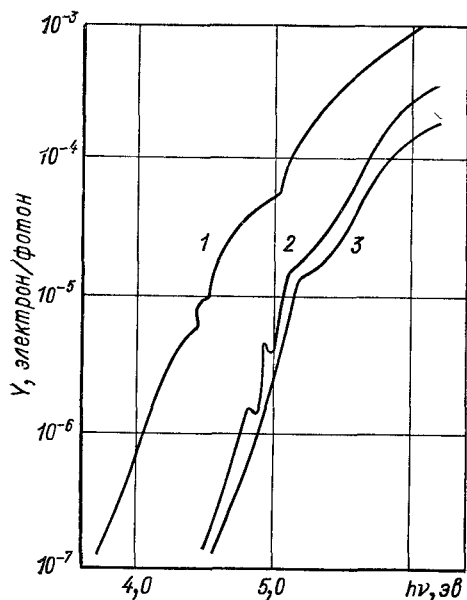
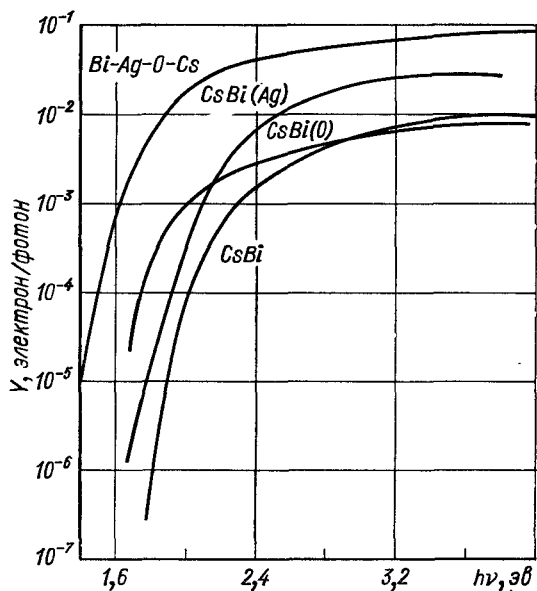


Рис. 24.22. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии ZnS для образцов с различной обработкой [6]:

1 — сколотый и отожженный либо подвергнутый ионной бомбардировке и отожженный; 2 — необработанный; 3 — свежесколотый.

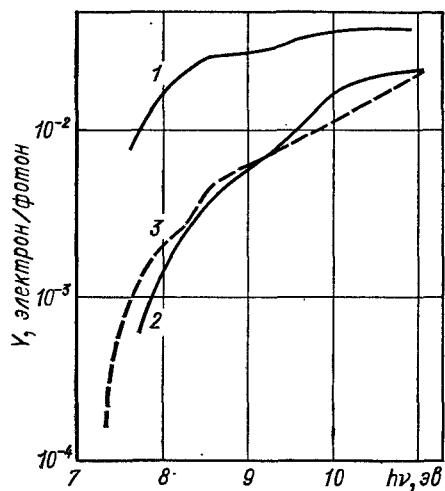


Рис. 24.23. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии SiC n- и p-типа [6]:

1 — p-SiC (рекс.); 2 — n-SiC (рекс.); 3 — SiC (куб.).

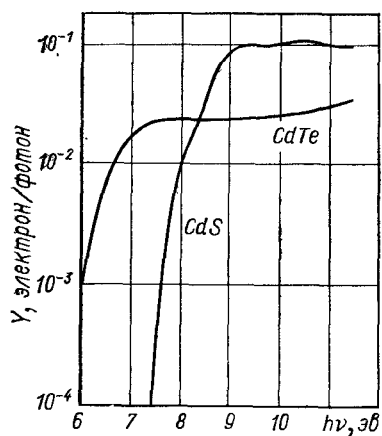


Рис. 24.24. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии для сколотых кристаллов CdS и CdTe [6].

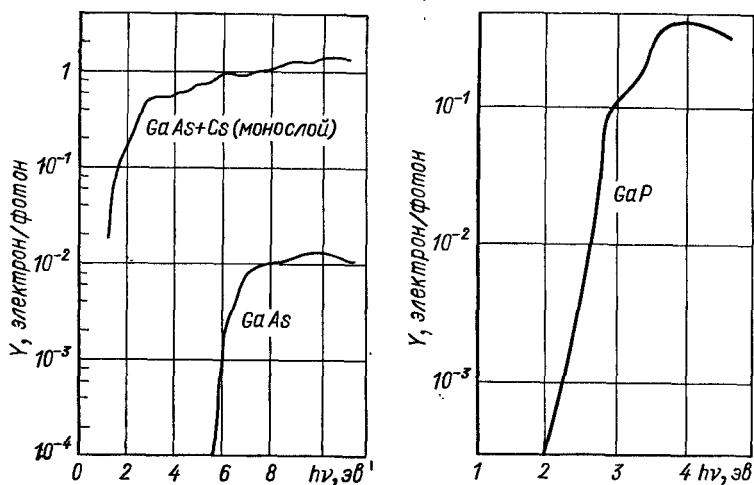


Рис. 24.25. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии p^+ -GaAs (сколотый образец) [4] и p -GaP [6]. Квантовый выход GaAs увеличивается после нанесения на сколотую поверхность монослоя Cs и может превысить единицу за счет генерации пар.

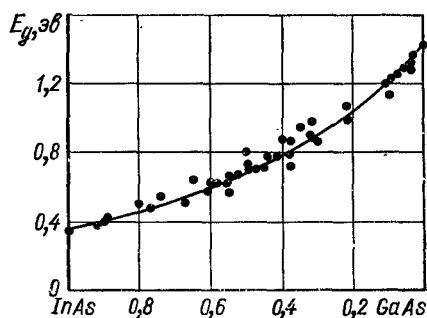
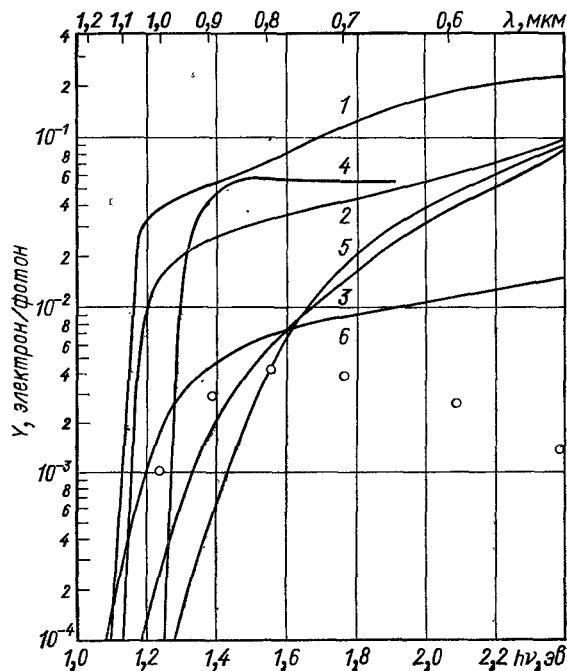


Рис. 24.26. Зависимость ширины запрещенной зоны E_g для твердых растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ от x [11].

Рис. 24.27. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии фотокатодов с отрицательным сродством к электрону на основе твердых растворов соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ [11]:

1 — $\text{InAs}_{0,13}\text{P}_{0,87}$ (ширина запрещенной зоны $E_g = 1,17$ эВ); 2 — $\text{GaAs}_{0,82}\text{Sb}_{0,18}$ ($E_g = 1,17$ эВ); 3 — $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ ($E_g = 0,9$ эВ); 4 — $\text{In}_{0,05}\text{Ga}_{0,95}\text{As}$ ($E_g = 1,32$ эВ); 5 — $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ ($E_g = 0,8$ эВ); 6 — $\text{In}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$ ($E_g = 0,96$ эВ). Кругами показана характеристика квантового выхода фотоэмиссии Ag-O-Cs-фотокатода.



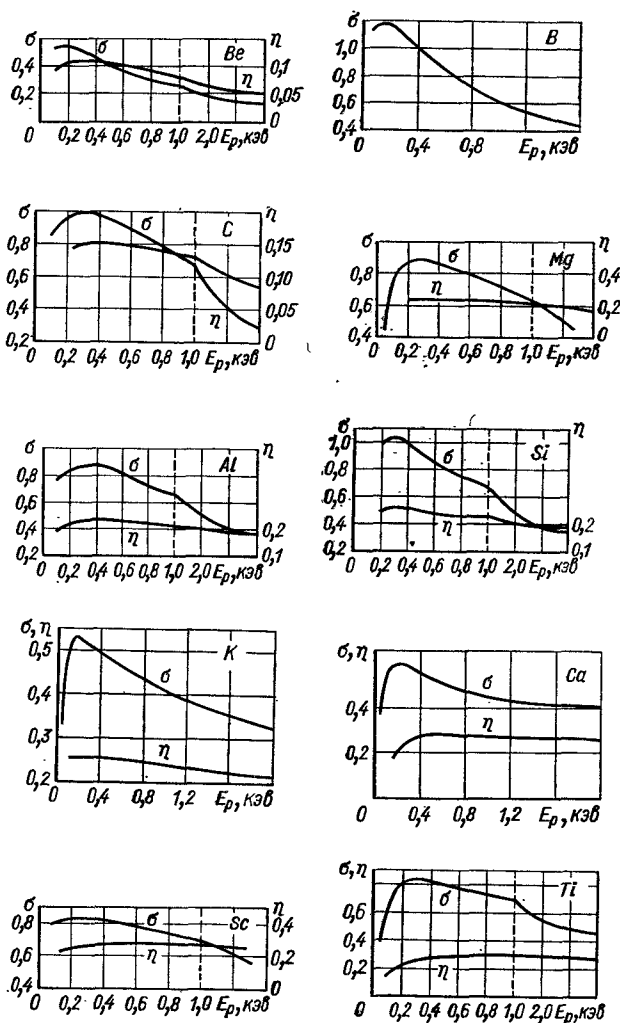
24.5. ВТОРИЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ) — эмиссия электронов, вызываемая бомбардировкой тел электронами [7]. Электроны, бомбардирующие поверхность тела, называются *первичными*; электроны, эмиттируемые телом, — *вторичными*. Вторичные электроны могут эмиттироваться как со стороны облучаемой первичным пучком поверхности тела (ВЭЭ «на отражение»), так и — в тонкопленочных эмиттерах — со стороны поверхности, противоположной облучаемой (ВЭЭ «на прострел»). Отношение числа электронов N_2 , испускаемых телом, к числу падающих на него за то же время первичных электронов N_1 называется *коэффициентом ВЭЭ* σ данного тела: $\sigma = N_2/N_1 = I_2/I_1$ (I_1 , I_2 — первичный и вторичный токи соответственно). Значение σ зависит от свойств и структуры эмиттера, состояния его поверхности, энергии первичных электронов E_p и угла падения первичного пучка на поверхность эмиттера. В потоке вторичных электронов имеются две группы электронов: истинно вторичные — электроны вещества, получившие от первичного пучка достаточно энергии для выхода в вакуум, и отраженные (упруго и неупруго) — часть первичного пучка, отражившаяся от поверхности эмиттера. При малых E_p ($E_p < 0,1$ кэв) основную долю вторичных электронов составляют упруго отраженные электроны. С ростом E_p доля упруго отраженных электронов быстро уменьшается и при $E_p > 0,1$ кэв составляет лишь несколько процентов всей ВЭЭ. Истинно первичные электроны имеют энергии от 0 до ~50 эв. Наиболее вероятная энергия истинно вторичных электронов составляет 1,5—3,5 эв и при $E_p > 20$ эв практически не зависит от E_p . Неупруго отраженные условно принято считать электроны вторичного пучка, энергия которых превышает 50 эв. Отношение числа неупруго отраженных электронов к числу первичных электронов $\eta = N_2 (E_2 > 50 \text{ эв}) / I_1$ называется коэффициентом неупругого отражения (в I_2 входят и упруго отраженные электроны, но число их мало и на величину η не сказывается). В металлах и полупроводниках максимальное значение σ лежит в пределах 0,5—1,8. В некоторых диэлектриках (MgO, щелочно-галогенидные кристаллы) σ значительно больше (10—20). Это обусловлено тем, что в таких материалах запрещенная зона велика ($E_g \approx 6 \div 12$ эв), сродство к электрону мало ($\chi < 1$ эв), вследствие чего медленные электроны с энергией, лежащей между χ и E_g , могут из большой глубины без потерь энергии подходить к поверхности тела и выходить в вакуум. При наложении на диэлектрик сильного электрического поля, направленного от эмиттирующей поверхности вглубь слоя (т. е. ускоряющего вторичные электроны к поверхности), σ значительно возрастает. Обычно сильное поле создается бомбардировкой тонкого слоя диэлектрика на металлической подложке электронами с E_p , при котором $\sigma > 1$. В результате поверхность диэлектрика заряжается положительно относительно металлической подложки до потенциала, близкого к потенциалу коллектора, на который отсасывается ток ВЭЭ. Ток ВЭЭ, возникающий в присутствии сильного электрического поля в эмиттере, состоит из двух компонент: *малоинерционной*, быстро следующей за изменениями первичного тока (эта часть ВЭЭ называется вторичной электронной эмиссией, усиленной полем, ее инерционность $< 10^{-6}$ сек), и *самоподдерживающейся*, существующей и при отсутствии первичного пучка, после того как осуществлена первоначальная зарядка слоя. В некоторых случаях ВЭЭ с электродов вакуумных приборов, подвергающихся бомбардировке электронами, является нежелательным паразитным эффектом. Для его устранения электроды покрывают веществами с малым σ : углерод (сажа, аквадаг), титан, цирконий, дисилициды переходных ме-

таллов. Такие покрытия называются *антидинаatronными*. Эффективные эмиттеры вторичных электронов: сурьмяно-цезиевый Cs₃Sb- и многослойный SbKNaCs-фотокатоды одновременно являются эффективными эмиттерами вторичных электронов, обладающими наиболее высоким σ при малых E_p ($E_p \leq 100$ эв). В фотоэлектронных умножителях (ФЭУ) широко применяются в качестве эмиттеров вторичных электронов (ВЭ) пленки окиси магния и окиси бериллия с избыточным содержанием атомов этих металлов. Такие пленки получают на поверхности двух- и трехкомпонентных сплавов серебра или меди с магнием и бериллием при прогреве их в атмосфере кислорода (иногда для улучшения механических свойств сплавов в их состав добавляют алюминий или кремний). В канальных ФЭУ используются эмиттеры ВЭ из проводящих стекол.

Основные характеристики эмиттеров ВЭ: зависимость коэффициента вторичной эмиссии σ и коэффициента неупругого отражения η от энергии первичных электронов E_p и максимальные значения этих коэффициентов: $\sigma_{\text{макс}}$ и $\eta_{\text{макс}}$.

Коэффициенты вторичной электронной эмиссии и неупругого отражения электронов



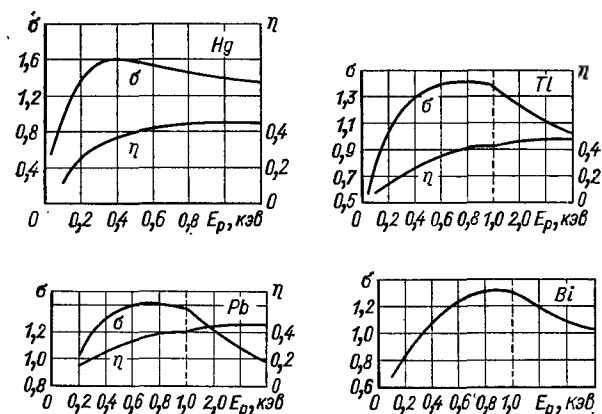


Рис. 24.28. — Рис. 24.69. Зависимости коэффициента вторичной электронной эмиссии σ и коэффициента неупругого отражения электронов η от энергии первичных электронов E_p для простых веществ [7].

Эффективные эмиттеры вторичных электронов

Таблица 24.16

$\sigma_{\text{макс}}$ и соответствующие им энергии первичных электронов E_p для эффективных эмиттеров [5]

Эмиттер	$\sigma_{\text{макс}}$	E_p , эВ
Кислородно-магнийевый	9—12	600—900
Медно-бериллиевый сплав	6—12	500—700
Медно-кислородно-цезиевый	6	700
Медно-магнийевая смесь (полученная испарением)	~12	500
Никель-бериллиевый сплав	12	700
Серебряно-кислородно-цезиевый	7—11	600—1100
Серебряно-магнийевая смесь (полученная испарением)	~9,5	500
Сложные барьерные поверхности (окислы металлов Ni, Mo, активированные барием)	12	600
Сурьмяно-литиевый	15	700—800
Сурьмяно-цезиевый	8—12	500

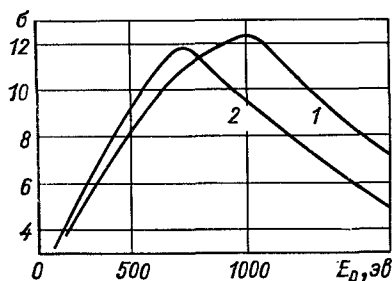


Рис. 24.70. Зависимости коэффициента вторичной электронной эмиссии σ от энергии первичных электронов E_p для эмиттеров [Ni]-NiO-Ba (1) и [Mo]-MoO₃-Ba (2) [5].

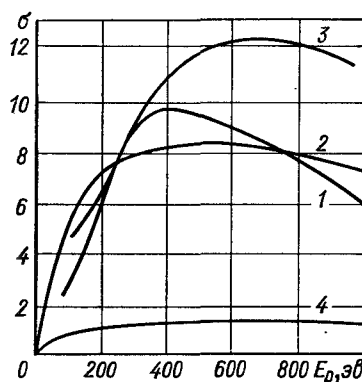


Рис. 24.71. Зависимости коэффициента вторичной электронной эмиссии σ от энергии первичных электронов для эмиттеров: 1 — серебро-магнийевый; 2 — серебро-цезиевый; 3 — никель-бериллиевый; 4 — никелевый [5].

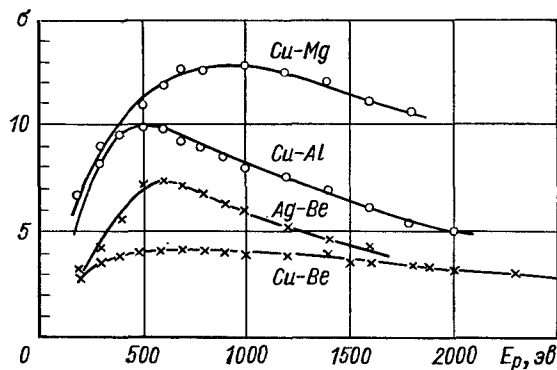


Рис. 24.72. Зависимости коэффициента вторичной электронной эмиссии σ от энергии первичных электронов E_p для различных металлических смесей, полученных испарением [5].

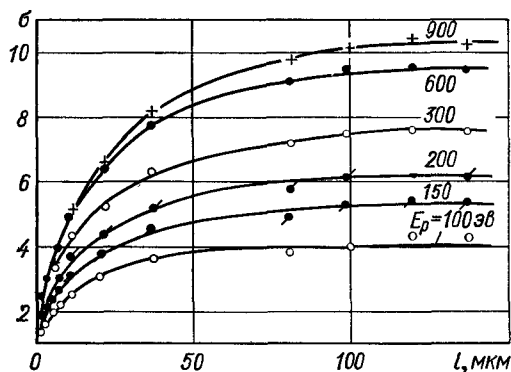


Рис. 24.73. Зависимости коэффициента вторичной электронной эмиссии σ от толщины Sb-Cs-эмиттера l при различных энергиях первичных электронов E_p [5].

Коэффициенты ВЭЭ некоторых двухкомпонентных металлических смесей [5]

Указанные в таблице значения коэффициентов ВЭ для различных металлических смесей не являются максимальными

Основной металл Ag				Основной металл Cu			
Массовое содержание, %	E_p при $\sigma = 500$ эв	Формирование в кислороде при давлении 10^{-4} — 10^{-3} мм рт.ст.		Массовое содержание, %	E_p при $\sigma = 500$ эв	Формирование в кислороде при давлении 10^{-4} — 10^{-3} мм рт.ст.	
		$t, ^\circ\text{C}$	Время, мин			$t, ^\circ\text{C}$	Время, мин
Al 2,2	5,1	600—680	70	Al 15	7,6	600	40
1,4	3,8	620—670	50	5	9,6	620	30
Ba 5	2,0	550—780	90	Be 2,3	5,7	720—770	60
Be 5	4,9	720	60	5	6,2	650—700	40
15	7,8	650	50	2 (сплав компактный)	5	650—700	40
Ca 1,3	4,9	700—750	30	Mg 5	12,2	550—620	35
Mg 5	9,5	570—620	30	10	9,4	570	30
15	8,5	570—620	40	15	9,1	570—620	30
5 (сплав)	9,2	570	30				

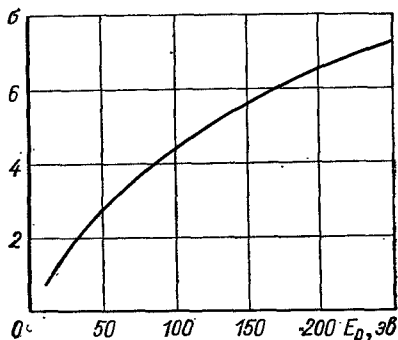


Рис. 24.74. Зависимость коэффициента вторичной электронной эмиссии от энергии первичных электронов E_p [5].

$$y = \frac{\Delta(e\varphi)}{e\varphi} = \frac{(eE)^{1/2}}{\varphi}$$

(см. табл. 24.18).

Если $e\varphi$ — в эв, а E — в в/см, то

$$j = 1,55 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{e\varphi} \exp \left[- \frac{6,85 \cdot 10^7 (e\varphi)^{3/2}}{E} \times \right. \\ \left. \times \theta \left(\frac{3,62 \cdot 10^{-4} E^{1/2}}{e\varphi} \right) \right].$$

Отсюда видно, что АЭ зависит от электрического поля так же, как термоэмиссия от температуры: $\ln(j/E^2) = \ln(1/E)$.

Теория АЭ полупроводников развита Страттоном, Елинсоном и др. [12]. АЭ эмиттеры используются пока ограниченно — в некоторых специальных электронно-лучевых приборах, в приборах для генерирования миллиметровых и субмиллиметровых волн [13]. Наиболее широкое применение явление АЭ нашло в автоэмиссионной и автоионной микроскопии [9]. В качестве АЭ эмиттеров чаще всего используются металлические острия из наиболее тугоплавких металлов: вольфрама, рения.

24.6. АВТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Автоэлектронная эмиссия (АЭ) — эмиссия электронов под действием внешнего электрического поля. Если внешнее электрическое поле достаточно велико для того, чтобы потенциальный порог превратился в барьер конечной и малой ширины и высоты, то становится возможным просачивание электронов сквозь барьер — квантовомеханическое туннелирование и выход их в вакуум. При этом электроны непосредственно после прохождения сквозь барьер имеют ту же энергию, что и в твердом теле, а электрическое поле совершает работу только на разгон электронов в вакууме в межэлектродном промежутке между эмиттером и анодом.

Плотность автоэмиссионного тока из металла при низкой ($T \ll 300^\circ\text{K}$) температуре эмиттера [8]:

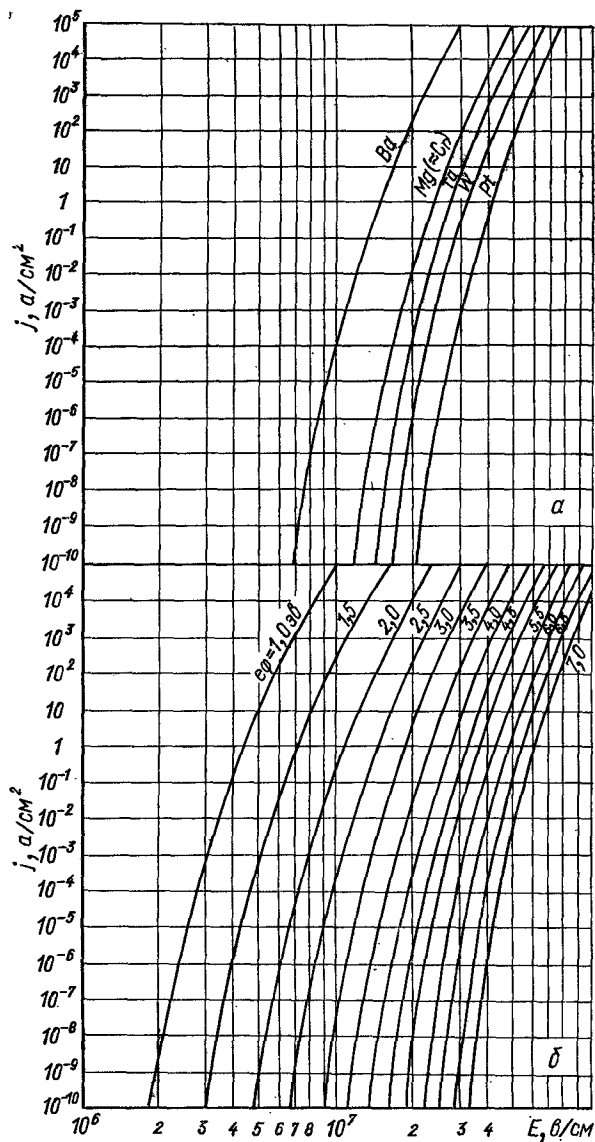
$$j = \frac{e^2 E^2}{8\pi h \varphi} \exp \left[- \frac{8\pi}{3} \frac{(2m)^{1/2}}{h} \frac{(e\varphi)^{3/2}}{eE} \theta(y) \right],$$

где $\theta(y)$ — функция Нордгейма, в которой аргументом является относительное снижение работы выхода внешним электрическим полем по Шоттки:

Таблица 24.18

Функция Нордгейма $\theta(y)$

y	$\theta(y)$	y	$\theta(y)$
0	1,0000	0,55	0,6351
0,05	0,9948	0,6	0,5768
0,1	0,9817	0,65	0,5152
0,15	0,9622	0,7	0,4504
0,2	0,9370	0,75	0,3825
0,25	0,9068	0,8	0,3117
0,3	0,8718	0,85	0,2379
0,35	0,8323	0,9	0,1613
0,4	0,7888	0,95	0,0820
0,45	0,7413	1	0
0,5	0,6900		



1. Добрецов Л. Н., Гомоюнова М. В. Эмиссионная электроника. М., «Наука», 1966.
2. Фоменко В. С. Эмиссионные свойства материалов. Справочник. Киев, «Наукова думка», 1970.
3. Кудинцева Г. А. и др. Термоэлектронные катоды. М.—Л., «Энергия», 1966.
4. Соболева Н. А. и др. Фотоэлектронные приборы. М., «Наука» 1965.
5. Чечик Н. О., Файнштейн С. М., Лифшиц Т. М., Электронные умножители. М., Физматгиз, 1957.
6. Sommer A. X. Фотоэмиссионные материалы. Пер. с англ. М., «Мир», 1972.
7. Бронштейн И. М., Фрайман Б. С. Вторичная электронная эмиссия. М., «Наука», 1969.
8. Елинсон М. И., Васильев Г. Ф. Автоэлектронная эмиссия. М., Физматгиз, 1958.
9. Автоионная микроскопия. Под ред. Д. Рена и С. Ранганатана. Пер. с англ. М., «Мир», 1971.
10. Ardenne M. Tabellen der Elektronenphysik, Ionenphysik und Übermikroskopie. Bd I. Berlin, 1956.
11. Bell R. L., Spicer W. E. "Proc. IEEE", 1970, v. 58, p. 1788.
12. Stratton R. "Proc. Phys. Soc.", 1955, v. 63, N 430, p. 746; "Phys. Rev.", 1962, v. 125, p. 67; Елинсон М. И. «Радиотехника и электроника», 1959, т. 4, с. 140; Васильев Г. Ф. «Радиотехника и электроника», 1958, т. 3, № 7; Моргулис Н. Д. «Журн. техн. физ.», 1947, т. 7, с. 963.
13. Техника спектроскопии в дальней инфракрасной, субмиллиметровой и миллиметровой областях спектра. Под ред. Д. Х. Мартина. Пер. с англ. М., «Мир», 1970, с. 268.
14. Wainfan N., Walker W. G. "J. Appl. Phys.", 1953 v. 24, p. 1318.

Рис. 24.75. Зависимости плотности автоэмиссионного тока j от напряженности электрического поля E для некоторых металлов (а) и эмиттеров с различной работой выхода (б) [10].

ГЛАВА 25

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

25.1. ЭФФЕКТ ЗЕЕБЕКА

Эффект Зеебека состоит в том, что в замкнутой электрической цепи из разнородных металлов возникает термоэлектродвижущая сила (термо-э. д. с.) E_{12} , если места контактов поддерживаются при разных температурах T_1 и T_2 .

E_{12} зависит только от температур T_1 и T_2 соединенных проводников и от природы материалов, составляющих термоэлемент. По E_{12} оценивают температуру в месте спая. В небольшом интервале температур имеет место зависимость $E_{12} = e_{12}(T_1 - T_2)$, где e_{12} — коэффициент термо-э. д. с., определяемый природой материалов термоэлемента и интервалом температур, в котором применяется термоэлемент. Поведение e_{12}

может резко меняться с температурой (может даже менять знак).

Измеряемые термо-э. д. с. относятся всегда к двум металлам и поэтому не являются характеристиками отдельных металлов. В таблицах обычно приводят термо-э. д. с. материалов по отношению к свинцу, платине или меди.

Абсолютные коэффициенты термо-э. д. с. e_1 , e_2 отдельных металлов вычисляются с помощью термодинамического соотношения:

$$e_{12} = \int_0^T \frac{S_1}{T} dT - \int_0^T \frac{S_2}{T} dT = e_1 - e_2,$$

где S_1 и S_2 — коэффициенты Томсона пары соединенных проводников (см. эффект Томсона, с. 466), e_1 и e_2 — абсолютные коэффициенты термо-э. д. с. этих проводников.

Таблица 25.1

Абсолютные коэффициенты термо-э. д. с. для некоторых металлов в зависимости от температуры [1]. *мкв/град*
(Определены с помощью коэффициентов Томсона)

$T, ^\circ\text{C}$	Pb	Cu	Pt
-255	-0,74	+0,34	+1,81
-240	-0,74	+0,89	+4,04
-200	-0,75	+1,37	+5,88
-160	-0,88	+1,15	+3,56
-120	-0,99	+1,15	+1,18
-80	-1,08	+1,30	-0,92
-40	-1,15	+1,51	-2,78
0	-1,22	+1,73	-4,42
+20	-1,26	+1,86	-5,13

Продолжение табл. 25.1

$T, ^\circ\text{C}$	Pb	Cu	Pt
+100	-1,44	+2,23	-7,3
+200	—	+2,77	-9,2
+300	—	+3,31	-10,9
+400	—	+3,85	-12,5
+500	—	+4,39	-14,0
+600	—	+4,93	-15,6
+700	—	+5,47	-17,1
+800	—	+6,01	-18,6
+900	—	+6,55	-20,1
+1000	—	+7,09	-21,6
+1200	—	+17	-24,6
+1400	—	—	-27,6
+1600	—	—	-30,6

Таблица 25.2

Абсолютные коэффициенты термо-э. д. с. для различных металлов в зависимости от температуры [2]

Приводимые значения e_1 вычислены, исходя из измеренных относительных коэффициентов e_{12} различных металлов по отношению к парному металлу, заключенному в круглые скобки, и абсолютных коэффициентов термо-э. д. с. этих парных металлов e_2 , которые приведены в табл. 25.1 и 25.2.

Термо-э. д. с. положительна, если ток в нагретом спае течет из металла 2 в металл 1.

Li(Pt)		Na(Pt)		K(Pt)		Rb (Pt)		Cs (Pt)	
$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкв}}{\text{град}}$	$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкв}}{\text{град}}$	$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкв}}{\text{град}}$	$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкв}}{\text{град}}$	$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкв}}{\text{град}}$
-50	+8,3	-50	-7,1	-50	-13,0	-50	-8,2	-50	-0,1
-25	+10,0	-25	-7,7	-25	-14,4	-25	-9,2	-25	-0,1
0	+11,5	0	-8,3	0	-15,6	0	-10,2	0	+0,1
+25	+12,2	+25	-8,7	+25	-16,6	+25	-11,1	+25	+0,1
+50	+11,5	+50	-9,2	+50	-17,6	+50	-7,5	+50	-5,8
+75	+11,0	+75	-9,7	+75	-16,9	+75	-8,3	+75	-4,6
+100	+10,4	+100	-10,4	+100	-18,0	+100	-8,9		
+125	+9,9			+125	19,1				

Продолжение табл. 25.2

Be (Pb)		Mg (Cu) монокристалл			Al(Pt)		Ti(Pt)		Th(Pt)	
$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкв}}{\text{град}}$	$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкв}}{\text{град}}$		$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкв}}{\text{град}}$	$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкв}}{\text{град}}$	$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкв}}{\text{град}}$
			*	⊥ *						
-150	-5,1				0	-1,6	0	+7,3	+400	-2,5
-100	-3,8	0	+3,38	+3,58	+50	-1,8	+100	+8,1	+500	-4,5
-50	-3,1	+25	+4,05	+4,77	+100	-1,9	+200	+7,4	+600	-6,5
0	-3,3	+50	+4,59	+5,67	+150	-1,8	+300	+4,3	+700	-9,5
+50	-2,0	+75	+4,98	+6,30	+200	-1,8	+400	+1,7	+800	-13
+100	-0,3	+100	+5,24	+6,63	+300	-2,0	+500	-0,7	+900	-16
+150	+0,4				+400	-2,3	+600	-2,1	+1000	-19
					+500	-2,5	+700	-2,6	+1100	-23
					+600	-2,8	+800	-2,8		
					+650	-3,0	+900	+0,6		
							+1000	+1,4		

V(Ag)		Nb (Ag)		Ta(Ag)		Cr (Ag)		Mo(Ag)	
$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$	$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$	$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$	$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$	$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$
-240	0,0	-240	+1,0	-240	+0,5			-240	+4,5
-200	+2,3	-200	+3,4	-200	+0,8	-200	+1,4	-200	+3,0
-100	+1,7	-100	+1,6	-100	-1,1	-100	+7,5	-100	+3,1
0	+1,0	0	-0,5	0	-2,3	0	+20,0	0	+5,9
+100	+0,7	+100	-1,5	+100	-3,3	+100	+15,8	+100	+8,6
+200	+0,9	+200	-1,6	+200	-3,5	+200	+15,0	+200	+11,2
+300	+1,3	+300	-1,6	+300	-3,3	+300	+15,8	+300	+13
		+400	-1,4	+400	-3,0			+400	+15

Продолжение табл. 25.2

W(Pt)		U (Pt)		Fe (Pt)		Co (Pt)		Ni (Pt)	
$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$	$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$	$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$	$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$	$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$
-100	-1,9	0	+8	+800	-0,1	+100	-32,3	+450	-20,2
0	+0,2	+100	+10	+900	-0,6	+200	-39,8	+550	-23,6
+100	+3,5	+200	+13	+910	-9,8	+300	-43,5	+650	-27,1
+200	+6,8	+300	+15	+1000	-9,1	+400	-46,0	+750	-30,3
+400	+12,6	+400	+18	+1100	-8,1	+500	-43,0	+850	-32,8
+550	+15,8	+500	+20	+1200	-6,6	+600	-39,0	+950	-35,2
+650	+19,2	+600	+20	+1300	-6,6	+800	-28,8	+1050	-37,3
+800	+22,3	+700	+21	+1400	-4,6	+900	-22,0		
+1000	+25,6	+800	+22	+1405	-1,7	+1000	-14,0		
+1100	+26,0	+900	+23	+1450	-1,4	+1100	-9,0		
+1300	+23,6								

Продолжение табл. 25.2

Ru (Pt)		Rh (Pt)		Pd (Pt)		Ir (Pt)		Ag (Pt)	
$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$	$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$	$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$	$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$	$T, ^\circ\text{C}$	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$
+200	-29,7	0	+0,9	0	-9,6	0	+0,8	-40	+1,0
+250	-31,7	+100	+0,8	+100	-13,4	+100	+0,2	+50	+1,4
+300	-32,5	+200	+0,8	+200	-16,3	+200	-0,1	+150	+1,8
+350	-35,2	+300	+0,6	+300	-18,8	+300	-0,6	+250	+2,3
+400	-38,8	+400	+0,5	+400	-21,7	+400	-0,9	+350	+3,4
+500	-42,2	+500	+0,2	+600	-28,5	+600	-1,7	+450	+4,5
+600	-44,3	+600	0	+800	-35,3	+800	-2,4	+550	+5,1
+700	-43,3	+800	-0,4	+1000	-41,5	+1000	-3,2	+650	+7,1
+800	-43,3	+1000	-0,9	+1200	-47	+1200	-4,7	+750	+7,9
+1000	-47	+1200	-1,5	+1400	-51	+1500	-9,0	+850	+8,8
+1150	-50			+1500	-53				
+1200	-51								
+1300	-53,5								

Au (Pt)		Zn (Cu)			Cd (Cu)			Hg (Cu)		Tl (Cu)	
T, °C	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$	T, °C	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$		T, °C	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$		T, °C	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$	T, °C	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$
			*	⊥ **		*	⊥ **				
0	+1,1	-253	-0,76	+1,28	-253	-0,15	+3,14	-200	+1,3	0	+0,84
+100	+1,8	-245	-0,81	+1,71	-240	-0,34	+2,24	-150	+1,75	+50	+0,09
+200	+2,4	-227	-1,90	+1,75	-225	-0,51	+1,59	-100	+1,95	+100	-0,41
+400	+3,1	-218	-2,41	+1,45	-183	-0,83	+0,67	-40	+3,60	+150	-0,67
+600	+3,3	-197	-1,06	+1,15	-149	-1,04	+0,59	-35	+7,20	+200	-0,69
+800	+3,7	-160	-0,46	+1,22	-140	-1,04	+0,63	0	+7,84	+233	-0,57
+1000	+3,7	-112	-0,06	+1,39	-81	-0,95	+1,20	+50	+9,51	+250	-0,46
		-80	+0,06	+1,57	0	-0,04	+3,16	+100	+11,55		
		0	+0,42	+2,16	+98	+1,98	+7,22	+150	+13,39		
		+98	+0,82	+3,36							

Продолжение табл. 25.2

Sb (Cu)			Bi (Cu)			Se (Ni)		Te (Cu)		C (Pt)	
T, °C	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$		T, °C	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$		T, °C	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$	T, °C	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$	T, °C	$e_1, \frac{\text{мкВ}}{\text{град}}$
	*	⊥ **		*	⊥ **						
0	+20,6	+46,8	-160	-75	-35	+35	+850	-190	+550	+1200	-6,5
+20	+21,3	+48,0	-120	-95	-45	+50	+860	-100	+550	+1500	-7,0
+40	+22,0	+49,1	-80	-104	-53	+100	+940	-50	+300	+1750	0
+60	+22,7	+50,2	-40	-105	-53	+150	1020	0	-100	+2000	+23
+80	+23,4	+51,4	0	-100	-53	+200	1100	+100	-150	+2200	+13,5
+100	+24,2	+52,6						+200	-100	+2400	-1,5
										+2700	-11
										+3100	-15

* || — гексагональная ось кристалла параллельна градиенту температур.

** ⊥ — гексагональная ось кристалла перпендикулярна градиенту температур.

Таблица 25.3

Термо-э. д. с. важнейших сплавов для термопар относительно платины при разных температурах [3]. мВ

T, °C	Хромель 90%Ni+10%Cr	Алюмель 94%Ni+Al+Si+Mn	Константан 60%Cu+40%Ni
-200	-3,36	+2,39	+5,35
-100	-2,20	+1,29	+2,98
0	0	0	0
+100	+2,81	-1,29	-3,51
200	5,96	-2,17	-7,45
300	9,32	-2,89	-11,71
400	12,75	-3,64	-16,19
500	16,21	-4,43	-20,79
600	19,62	-5,28	-25,47
700	22,96	-6,18	-30,18
800	26,23	-7,08	-34,86
900	29,41	-7,95	-39,45
1000	32,52	-8,79	-43,92
1100	35,56	-9,58	—
1200	38,51	-10,34	—
1300	41,35	-11,06	—
1400	44,04	-11,77	—

Таблица 25.4

Термо-э. д. с. металлов и сплавов при различных давлениях и температурах [4], мкВ

В таблице дана зависимость от температуры термо-э. д. с. (мкВ) между металлом, сжатым всесторонним давлением p (кГ/см²), и тем же металлом, находящимся при нормальном давлении. Термо-э. д. с. считается положительной, если ток в нагретом спае течет от несжатого металла к сжатому.

Металлы и сплавы	T, °C	$p, 10^3 \text{ кГ/см}^2$		
		4	8	12
Алюминий	20	-0,081	-0,098	-0,068
	60	-0,060	+0,146	+0,543
	100	+0,294	+0,929	+1,962
Вольфрам	20	+0,90	+1,80	+2,70
	60	+2,87	+5,72	+8,58
	100	+4,99	+10,12	+15,14
Висмут	20	+42	+106	+185
	60	+134	+308	+539
	100	—	—	—

Продолжение табл. 25.4

Металлы и сплавы	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, 10^8 \text{ кг/см}^2$		
		4	8	12
Железо (отожженное)	20	-0,15	-0,50	-0,99
	60	+1,08	+1,31	+1,40
	100	+3,25	+5,82	+7,68
Железо (неотожженное)	20	-0,15	-0,45	-0,74
	60	+1,05	+1,54	+2,20
	100	+4,42	+8,70	+12,80
Золото	20	+0,333	+0,670	+0,990
	60	+1,115	+2,196	+3,213
	100	+2,051	+3,974	+5,760
Кадмий	20	+1,10	+3,46	+6,68
	60	+6,22	+13,98	+23,92
	100	+14,38	+28,74	+45,56
Кобальт	20	-1,20	-2,37	-3,52
	60	-3,86	-7,70	-11,47
	100	-6,92	-13,60	-20,61
Константан	20	+2,29	+4,53	+6,75
	60	+6,99	+13,82	+20,77
	100	+11,81	+23,79	+35,47
Магний	20	-0,72	-1,58	-2,59
	60	-2,17	-4,75	-7,79
	100	-3,62	-7,91	-12,96
Манганин	20	-0,103	-0,215	-0,308
	60	-0,286	-0,573	-0,846
	100	-0,452	-0,894	-1,314
Медь	20	+0,224	+0,424	+0,596
	60	+0,700	+1,370	+1,976
	100	+1,216	+2,420	+3,546
Молибден	20	+0,052	+0,101	-0,146
	60	+0,218	+0,436	+0,649
	100	+0,278	+0,555	+0,833
Никель	20	+0,55	+1,17	+1,88
	60	+1,85	+3,97	+6,32
	100	+3,40	+7,19	+11,44
Олово	20	0,000	-0,045	-0,182
	60	+0,083	+0,122	+0,103
	100	+0,165	+0,292	+0,390
Палладий	20	+1,76	+3,40	+5,09
	60	+5,28	+10,41	+15,64
	100	+8,80	+17,69	+26,52
Платина	20	+1,29	+2,56	+3,88
	60	+4,39	+8,96	+13,39
	100	+7,31	+14,35	+21,57

Продолжение табл. 25.

Металлы и сплавы	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, 10^3 \text{ кг/см}^2$		
		4	8	12
Свинец	20	+0,32	+0,69	+1,06
	60	+1,14	+2,29	+3,44
	100	+2,12	+4,21	+6,33
Серебро	20	+0,66	+1,28	+1,90
	60	+2,10	+4,08	+6,02
	100	+3,72	+7,19	+10,56
Таллий	20	+3,55	+6,44	+8,78
	60	+11,45	+21,01	+29,15
	100	+20,29	+37,63	+52,46
Цинк	20	+4,9	+9,6	+14,4
	60	+15,9	+32,1	+47,4
	100	+28,5	+58,1	+87,4

Таблица 25.5

Коэффициенты термо-э. д. с. различных металлов и сплавов в магнитном поле при насыщении относительно тех же самых металлов без магнитного поля [5, 6]

Металл	Область температур, $^\circ\text{C}$	$\epsilon_{12}^*, \text{ мкВ/град}$	
		$\epsilon_{12 \parallel}$	$\epsilon_{12 \perp}$
Fe	10-95	+0,90	-0,058
Ni	10-97	+0,301	-0,136
Ni	5-100	+0,20	-0,11
Ni + 5% Мп	5-100	+0,26	-0,12
Ni + 10% Мп	5-100	+0,12	—
Ni + 15% Мп	5-100	+0,065	-0,02
Ni + 25% Мп	5-100	—	-0,05
Ni + 30% Мп	5-100	—	-0,10

* $\epsilon_{12 \parallel}$ — коэффициент термо-э. д. с. в магнитном поле, параллельном градиенту температуры; $\epsilon_{12 \perp}$ — коэффициент термо-э. д. с. в магнитном поле, перпендикулярном градиенту температуры.

25.2. ЭФФЕКТ ПЕЛЬТЬЕ

Эффект Пельтье обратен эффекту Зеебека. При прохождении тока через спай различных проводников кроме джоулева тепла выделяется или поглощается, в зависимости от направления тока, некоторое количество тепла Q_p , пропорциональное протекающему через контакт заряду (т. е. силе тока I и времени t) $Q_p = \Pi It$, где Π — коэффициент Пельтье, который зависит от природы находящихся в контакте материалов.

Согласно термодинамической теории, коэффициент Пельтье связан с коэффициентом термо-э. д. с. $e = dE/dT$ соотношением $\Pi = eT$.

Таблица 25.6

Коэффициент Пельтье для различных металлов [7]

Стрелка показывает направление тока через нагретый спай

Пара металлов	$T, ^\circ\text{C}$	$\Pi, \frac{\text{мккал}}{\text{К}}$	Пара металлов	$T, ^\circ\text{C}$	$\Pi, \frac{\text{мккал}}{\text{К}}$
As $\rightarrow$ Pb	20	0,91	Fe $\rightarrow$ Cu	0	0,664
Bi $\parallel \rightarrow$ Bi $\perp$	20	3,59*	Fe $\rightarrow$ Hg	18,4 99,64 182,3	1,1644 1,388 1,511
Cd $\parallel \rightarrow$ Cd $\perp$	20	0,208*	Fe $\rightarrow$ Ni	15	2,288
Cd $\rightarrow$ Ni	15	1,53	Fe $\rightarrow$ Константан	0	3,10
Cu $\rightarrow$ Ag	0	0,0168	Pb $\rightarrow$ Bi	20	5,16
Cu $\rightarrow$ Al	14	0,405	Pb $\rightarrow$ Константан	0 100 200 300	1,90 2,73 3,6 4,4
Cu $\rightarrow$ Au	0	0,0813	Sb $\rightarrow$ Bi	20	10,7
Cu $\rightarrow$ Bi	18	3,85	Sb $\rightarrow$ Pb	20	0,186
Cu $\rightarrow$ Ni	0	1,90	Zn $\rightarrow$ Ni	15	1,534
	14,4	1,385	Zn $\parallel \rightarrow$ Zn $\perp$	20	0,126*
Cu $\rightarrow$ Pd	0	0,588	Графит $\rightarrow$ Cu	20	0,703
Cu $\rightarrow$ Pt	0	0,238			
Cu $\rightarrow$ Константан	15,5	2,436			

* Вычислено по термодинамической формуле из значений коэффициента Томсона и термо-э. д. с.

Таблица 25.7

Зависимость коэффициента Пельтье, измеренного калориметрическим методом для различных пар металлов, от температуры

Чтобы получить коэффициенты Пельтье в милликалориях на кулон, надо приведенное в таблице число умножить на 0,239.

Железо — кон- стантан * (8)		Медь — никель (6)		Свинец — константан (9)	
$T, ^\circ\text{C}$	$\Pi, \text{мв}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\Pi, \text{мв}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\Pi, \text{мв}$
0	+13	19	+8,0	20	+8,7
20	+15	55	+9,0	110	+11,8
130	+19	205	+10,3	235	+16,0
240	+26	290	+8,6	305	+18,7
320	+34	340	+8,0	360	+20,6
560	+52	445	+10,0	440	+23,4

* Медь — константан: $\Pi = 11,0 \text{ мв}$ при $T = 20^\circ\text{C}$ [10].

25.3. ЭФФЕКТ ТОМСОНА

Если вдоль проводника, по которому протекает электрический ток, существует перепад температур ($T_2 - T_1$), то кроме джоулева тепла в объеме проводника выделяется или поглощается, в зависимости от направления тока, некоторое количество тепла

$$Q_S = S(T_2 - T_1) I,$$

где S — коэффициент Томсона, зависящий от природы материала; I — ток; t — время.

Согласно термодинамической теории, коэффициент термо-э. д. с. пары проводников связан с их коэффициентами Томсона соотношением

$$de/dt = (S_1 - S_2)/T.$$

Таблица 25.8

Значения коэффициента Томсона для различных металлов

Чтобы получить коэффициент Томсона в $\text{мккал}/(\text{К} \times ^\circ\text{град})$, надо умножить S на 0,239. Коэффициент Томсона имеет положительный знак, если направление потока тепла совпадает с направлением тока.

Металл	$T, ^\circ\text{К}$	$S, \frac{\text{мкв}}{^\circ\text{град}}$	Литература
Ag	105	-0,10	[11]
	150	+0,55	[11]
	300	+1,31	[11]
Al(99%)	260	+0,11	[11]
	300	-0,08	[11]
	400	-0,56	[11]
Au	105	+0,29	[11]
	150	+0,96	[11]
	300	+1,61	[11]
Cd (монокристалл)	$\parallel^*$ 373	+6,9	[18]
	473	+7,3	[18]
	$\perp^{2*}$ 373	+8,2	[18]
	473	+8,7	[18]
Co	100	-8,4	[19]
	200	-19,6	[19]
	300	-25,4	[19]
Cu	70	-0,26	[14]
	170	+0,47	[14]
	300	+1,52	[14]
Cu+0,37 ат. % Au	20	+0,44	[14]
	40	+2,17	[14]
	60	+2,96	[14]
	90	+2,20	[14]
	130	+1,71	[14]
	300	+2,33	[14]
Fe (Армко)	323	-15,3	[12]
	423	-22,8	[12]
	523	-26,3	[12]

Металл	$T, ^\circ\text{K}$	$S, \frac{\text{мкв}}{\text{град}}$	Литера- тура	
Ni	100	— 4,5	[19]	
	200	— 12,1	[19]	
	260	— 15,7	[19]	
Pb (99,99%)	120	— 0,19	[11]	
	200	— 0,45	[11]	
	400	— 0,85	[11]	
Pd	20	+ 1,9	[19]	
	100	— 7,8	[19]	
	200	— 12,1	[19]	
	300	— 18,2	[19]	
Pt	203	— 9,6	[13]	
	273	— 9,1	[13]	
	393	— 9,2	[13]	
Sn(99,99%)	100	+ 0,86	[11]	
	200	+ 0,42	[11]	
	300	— 0,07	[11]	
	400	— 0,45	[11]	
Zn (монокристалл)	*	322,5	+ 1,6	[17]
		398	+ 4,6	[17]
	⊥ 2*	322,5	+ 4,1	[17]
		398	+ 8,8	[17]
W	328	+ 8,5	[11]	
Константан	323	— 24,6	[16]	
	384	— 25,5	[16]	
	446	— 26,0	[16]	
Нейзильбер	328	— 12,0	[15]	

* || — образец вырезан вдоль гексагональной оси кристалла (Томс-эффект измеряется вдоль образца).

* * ⊥ — образец вырезан под углом 90° к гексагональной оси кристалла.

1. Borelius G. Handb. Metallphysik. Berlin, J. Springer, 1935.
2. Landolt-Börnstein. Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, 6 Teil, Elektrische Eigenschaften. Berlin, Göttingen—Heidelberg, Springer-Verlag, 1959.
3. American Institute of Physics Handbook. Ed. D. Gray. Mc Graw-Hill Book, Company., Inc., New — York—Toronto—London, 1957.
4. Bridgmen P. W. "Proc. Amer. Acad. Arts Sci.", 1917/18, v. 53, p. 267.
5. Аннаев Р. Г. «Докл. АН СССР», 1948, т. 63, с. 639.
6. Konsmine I. "Helv. Phys. Acta", 1934, v. 7, p. 732.
7. Сборник физических констант. Ред. Дорфман Я. Г. и Фриш С. Э. М., ОНТИ, 1937.
8. Cerman P. "Ann. Physik", 1907, v. 24, p. 351.
9. Cerman P. "Ann. Physik", 1908, v. 26, p. 521.
10. Woodall A. J. "Proc. Phys. Soc.", 1935, v. 47A, p. 615.
11. Borelius G. "Ann. Physik", 1921, v. 65, p. 519.
12. Joung J. "Proc. Phys. Soc.", 1925, v. 37A, p. 145.
13. Berg O. "Ann. Physik", 1910, v. 32, p. 477.
14. Borelius G., Kessom W. H. "Comm. Kamerlingh Onnes Lab. Univ. Leiden", 1929, v. 196a, p. 3.
15. Smith H. E. "Proc. Phys. Soc.", 1925, v. 38A, p. 1.
16. Nettleton R. "Proc. Phys. Soc.", 1922, v. 34A, p. 77.
17. Ware L. A. "Phys. Rev.", 1930, v. 35, p. 989.
18. Verleger H. "Ann. Physik", 1931, v. 9, p. 366.
19. Borelius G. e. a. "Proc. Amsterdam", 1930, v. 33, p. 17.

ГЛАВА 26

ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ И ТЕРМОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

26.1. ВВЕДЕНИЕ

Гальваномагнитные явления — совокупность явлений, возникающих под действием магнитного поля в проводниках (металлах и полуметаллах), по которым протекает электрический ток.

Термомагнитные явления — совокупность явлений, возникающих под действием магнитного поля в проводниках, внутри которых имеется тепловой поток. Наиболее характерные черты этих явлений связаны с активным

воздействием внешнего магнитного поля на движение носителей тока.

При поперечном намагничивании проводника с током ($\mathbf{H} \perp \mathbf{J}$) наблюдаются следующие гальваномагнитные явления:

1) в направлении, перпендикулярном к вектору магнитного поля и вектору плотности тока $\mathbf{J}$, возникает электрическое поле (эффект Холла) $\mathbf{E} = R[\mathbf{JH}]$, где R — коэффициент Холла;

2) в направлении, перпендикулярном к вектору маг-

нитного поля $\mathbf{H}$ и вектору плотности тока $\mathbf{J}$, возникает температурный градиент (эффект Эттингсгаузена) $\nabla T = P[\mathbf{JH}]$, где P — коэффициент Эттингсгаузена;

3) изменяется сопротивление проводника, что эквивалентно возникновению добавочной разности потенциалов вдоль направления электрического тока.

При поперечном намагничивании проводника возникают следующие термомагнитные явления:

1) в направлении, перпендикулярном градиенту температур ∇T и направлению магнитного поля $\mathbf{H}$, возникает электрическое поле (эффект Нернста) $\mathbf{E} = Q[\nabla T \mathbf{H}]$ при $\mathbf{J} = 0$, где Q — коэффициент Нернста; 2) в направлении, перпендикулярном градиенту температур $\nabla_x T$ и направлению магнитного поля $\mathbf{H}$, возникает градиент температур (эффект Риги—Ледюка) $\nabla_y T = S[\mathbf{H} \cdot \nabla_x T]$, где S — коэффициент Риги—Ледюка. При продольном намагничивании образца изменяются электросопротивление, термо-э. д. с. и теплопроводность.

Значения коэффициентов гальваномагнитных эффектов в металлах отличаются большим разнообразием, связанным со сложностью зонной структуры и формы поверхности Ферми. Гальвано- и термомагнитные эффекты очень чувствительны ко всякого рода примесям и неоднородностям. По этой причине приведенные в таблицах значения коэффициентов надо рассматривать лишь как наиболее заслуживающие доверия.

Различают гальваномагнитные явления нечетные (т. е. зависящие от нечетных степеней H) и четные (т. е. зависящие от четных степеней H). Наиболее важен из нечетных — эффект Холла, наиболее существен из четных эффектов — эффект изменения сопротивления в магнитном поле.

Эффект Холла

Опыт показывает, что коэффициент Холла R может быть положительным и отрицательным и даже менять знак с изменением температуры. Для большинства металлов наблюдается почти полная независимость коэффициентов Холла от температуры. Резко аномальным эффектом Холла обладают висмут и другие металлы V группы периодической системы. Значения гальваномагнитных коэффициентов этих металлов помещены в отдельную таблицу (табл. 26.7).

В ферромагнетиках поле $\mathbf{H}$ изменяет направление намагниченности доменов, так что на электроны проводимости воздействует магнитное поле, отличное от внешнего. При этом наблюдается особый, ферромагнитный, эффект Холла. Для ферромагнетиков экспериментально найдено, что

$$E_R = (R_0 \mu_0 H + R_1 M) J, \quad (26.1)$$

где E_R — поле Холла в направлении y (рис. 26.1); H — напряженность магнитного поля; μ_0 — постоянная индукции; M — намагниченность образца; J — плотность тока, протекающего через образец; R_0 и R_1 — обычный и необыкновенный (аномальный) коэффициенты Холла.

Последнее соотношение с учетом равенства $B = \mu_0 H + M$ можно записать в виде

$$e = \frac{U_R d}{I} = R_0 B + R_S M, \quad (26.2)$$

где U_R — напряжение Холла; I — полный ток через образец; d — толщина образца; $R_S = R_1 - R_0$ — так называемый спонтанный, или ферромагнитный, коэффициент Холла. Для большинства ферромагнитных металлов обнаружено, что $R_0 \ll R_1$ и $R_S \approx R_1$.

Из этого выражения определяют коэффициенты Холла, используя экспериментальные зависимости $e(B)$ (рис. 26.2).

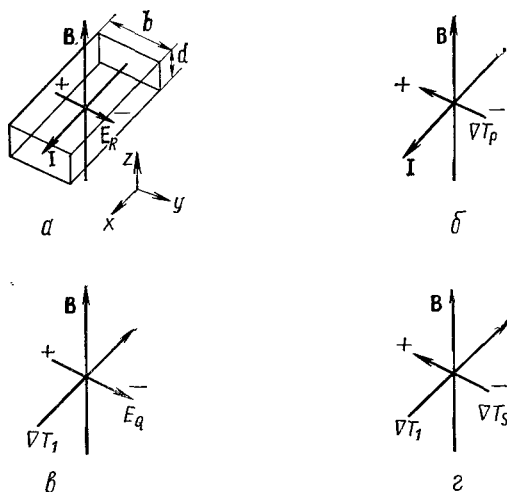


Рис. 26.1. Схемы ориентации векторов $\mathbf{B}$, $\mathbf{I}$, $\mathbf{E}_R$, $\text{grad } T$.

a — для эффекта Холла; b — для эффекта Нернста; c — для эффекта Эттингсгаузена; d — для эффекта Риги—Ледюка.

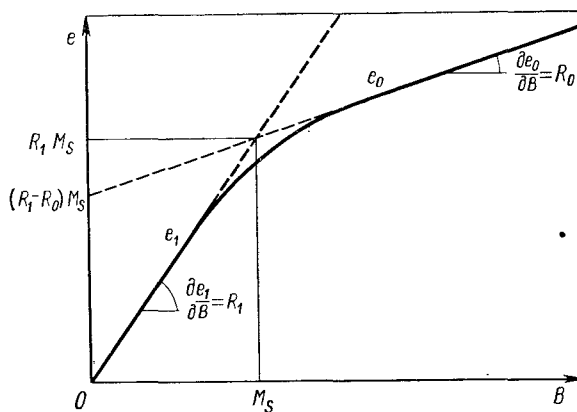


Рис. 26.2. Зависимость э. д. с. Холла e от магнитной индукции для ферромагнитной пластинки. Определение обычного R_0 и аномального R_1 коэффициентов Холла.

Выше магнитного насыщения второй член в (26.2) постоянен, и тогда зависимость $e(B)$ переходит в прямую линию. Ее наклон дает R_0 . Продолжив прямую линию до $B = 0$, получим отрезок на оси ординат, равный $R_S M_S$, где M_S — намагниченность насыщения образца. Отсюда определяют R_S . Обычно $R_S \gg R_0$ и сильно зависит от температуры. С повышением температуры коэффициент Холла R_S возрастает, достигая максимума в точке Кюри, а затем снижается. В парамагнитной области температур эффект Холла определяется соотношением

$$e = R^* H,$$

где $R^* = R_0 + \chi R_S = R_0 + R_p$; χ —диэлектрическая восприимчивость вещества; R_p —парамагнитный коэффициент Холла—Кикоина.

Значения гальваномагнитных коэффициентов ферромагнитных металлов помещены в отдельную таблицу (26.13).

Терромагнитные эффекты в ферромагнетиках определяются аналогично по следующим формулам:
эффект Эттингсгаузена

$$\frac{\partial T_P}{\partial y} = (P_0 \nu_0 H + P_1 M) I;$$

эффект Риги — Ледюка

$$\frac{\partial T_S}{\partial y} = (S_0 \nu_0 H + S_1 M) \frac{\partial T}{\partial x};$$

эффект Нернста

$$\frac{\partial U_Q}{\partial y} = (Q_0 \nu_0 H + Q_1 M) \frac{\partial T}{\partial x}.$$

Изменение сопротивления в магнитном поле (магнетосопротивление)

При обычно используемых напряженностях поля $H \ll 10^4$ э и комнатной температуре магнетосопротивление $\Delta \rho / \rho_0$ ($\Delta \rho$ — изменение сопротивления в магнитном поле, ρ_0 — сопротивление при $H = 0$) для большинства металлов весьма мало. Например, для меди $\Delta \rho / \rho_0 \approx 10^{-4}$ при $H = 2 \cdot 10^4$ э. Исключением является висмут, у которого $\Delta \rho / \rho_0 \approx 2$ при $H = 3 \cdot 10^4$ э. В полупроводниках этот эффект значительно больше, чем в металлах (например, в германии при $T \approx 100^\circ$ К и

$H = 2 \cdot 10^4$ э $\Delta \rho / \rho_0 \approx 3$).

У большинства металлов и полупроводников (за исключением ферромагнитных) удельное сопротивление ρ с ростом магнитного поля возрастает. В сильных магнитных полях характер зависимости сопротивления от H существенно связан с характером энергетического спектра электронов. Все металлы с замкнутыми поверхностями Ферми, у которых число электронов n_1 не равно числу дырок n_2 (Na, Al, In), имеют сопротивление, которое сравнительно слабо возрастает в сильных магнитных полях.

Металлы с замкнутыми поверхностями Ферми, для которых число электронов равно числу дырок ($n_1 = n_2$) (Bi, Be и др.), характеризуются квадратичной зависимостью ρ от H , причем это имеет место при любом направлении H . Исключение составляет случай продольного поля ($H \parallel I$), когда сопротивление стремится к насыщению. Для металлов с замкнутыми поверхностями Ферми линейное возрастание сопротивления с увеличением напряженности поля, по-видимому, наблюдается в промежуточных полях.

У металлов с открытыми поверхностями Ферми (Sn, Au, Zn, Ta и др.) наблюдается резкая анизотропия гальваномагнитных свойств; при одних направлениях H — квадратичное возрастание с увеличением напряженности, при других — насыщение. В ряде случаев линейное возрастание сопротивления с ростом H является результатом усреднения.

В ферромагнитных металлах зависимость ρ от H имеет ряд особенностей, которые обусловлены наличием в этих веществах самопроизвольной намагниченности. В больших магнитных полях выше технического насыщения материала (или в области пара-процесса) сопротивление с ростом поля всегда уменьшается независимо от направления магнитного поля по отношению к току.

Значения всех гальвано- и терромагнитных коэффициентов даны в таблицах в системе СИ. Для перевода в другие системы единиц следует пользоваться табл. 26.1

Таблица 26.1

Таблица перевода единиц измерения коэффициентов гальвано- и терромагнитных явлений из системы СИ в другие системы

Величина	Обозначение	Система СИ	Практическая система (внесистемные единицы)	Система СГСМ
Магнитная индукция	B	$\frac{вб}{м^2} = \frac{в \cdot сек}{м^2}$	10^4 гс	10^4 см $^{-1/2} \cdot э^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Коэффициент Холла	R	$\frac{м^3}{к} = \frac{м^3}{а \cdot сек}$	$10^{-2} \frac{в \cdot см}{а \cdot гс}$	10^7 см $^{5/2} \cdot э^{-1/2}$
Коэффициент Эттингсгаузена	P	$\frac{град \cdot м^3}{в \cdot а \cdot сек}$	$10^{-2} \frac{град \cdot см}{а \cdot гс}$	10^{-1} град $\cdot см \cdot э^{-1} \cdot сек^2$
Коэффициент Риги — Ледюка	S	$\frac{м^2}{в \cdot сек}$	10^{-4} гс $^{-1}$	10^{-4} см $^{1/2} \cdot э^{-1/2} \cdot сек$
Коэффициент Эттингсгаузена — Нернста	Q	$\frac{м^2}{град \cdot сек}$	$10^{-4} \frac{в}{град \cdot гс}$	10^4 град $^{-1} \cdot см^2 \cdot сек^{-1}$

26.2 КОЭФФИЦИЕНТЫ ХОЛЛА ДЛЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Продолжение табл. 26.2

Таблица 26.2
Коэффициенты Холла для металлов

Металлы	$T, ^\circ\text{K}$	$B, \text{вб/м}^2$	$R, 10^{-10} \frac{\text{м}^3}{\text{К}}$	Температура
Li	297	1,7—1,8	—1,70	[1]
Be (99,5%)*	290	0,3—2,0	+7,7	[4]
Na	298	0,2—2,04	—2,1	[2]
Mg	300	0,4—2,5	—0,83	[5]
Al (99,5%)	83 273 573 873	0,54 0,54 0,54 0,54	—0,22 —0,33 —0,39 —0,41	[8] [8] [8] [8]
K	258—333	0,4—2,04	—4,2	[2]
Ca (99%)	293	0,3—1	—1,78	[6]
Ti (99,91%)	291	1,2—2,9	—0,26	[15]
Ti (99,87%)	294 294 294 294	0,4—2,8 — — —	+0,10 +0,72* —1,083* +0,422* —0,773*	[15] [16] [16] [17] [17]
V	301	0,3—2,9	+0,82	[14]
V (99,63%)	293 20	— —	+0,79 +0,62	[21] [21]
Cr (99,9%)	287	1,0—2,9	+3,63	[14]
Mn(99,99%)	297	0,6—2,9	+0,84	[14]
Cu	298,2 328,2 358,2	1,13—1,14 1,13—1,14 1,13—1,14	—0,536 —0,537 —0,538	[31] [31] [31]
Cu (99,9%)	83 173 273 573 873	0,54 0,54 0,54 0,54 0,54	—0,560 —0,510 —0,513 —0,543 —0,587	[30] [30] [30] [30] [30]
Cu (отожженная)	300 150 50 40 4	0—1,5 0—1,5 0—1,5 0—1,5 0—1,5	—0,53 —0,54 —0,63 —0,68 —0,65	[32] [32] [32] [32] [32]
Zn (технический)	293	0,5—1,1	+1,04	[29]
Ga	293	1,63	—0,63	[36]
Rb	293—308	0,2—1,6	—4,2	[3]

Металл	$T, ^\circ\text{K}$	$B, \text{вб/м}^2$	$R, 10^{-10} \frac{\text{м}^3}{\text{К}}$	Температура
Y (99,2%)	293	0,56	—0,770	[9]
Y (монокристалл $\rho_{293^\circ\text{K}} = 10,4$)	290 290 4 4	0—1,0 0—1,0 0—1,0 0—1,0	—1,722* —0,473* —0,42* —0,983*	[10] [10] [10] [10]
Y (монокристалл $\rho_{293^\circ\text{K}} = 16$)	4	0—1,0	—0,983*	[10]
См. рис. 26.3 [11]				
Zr (97,3% Zr + 2,4% Hf)	83 273 573 873	0,54 0,54 0,54 0,54	+1,08 +1,385 +0,695 +0,215	[8] [8] [8] [8]
Zr ($\frac{\rho_{293^\circ\text{K}}}{\rho_{4,2^\circ\text{K}}} = 38$)	100 200 300	0—1,5 0—1,5 0—1,5	+3,15 +2,72 +2,15	[18] [18] [18]
Nb	83 273 873	0,54 0,54 0,54	+0,92 +0,88 +0,91	[8] [8] [8]
Mo	83 273 873	0,54 0,54 0,54	+1,79 +1,80 +1,76	[8] [8] [8]
Ru	293	4,47	+2,2	[26]
Rh (99,5%)	291	4,9	+0,505	[27]
Pd	299 318 337	0,87—0,92 0,87—0,92 0,87—0,92	—0,845 —0,855 —0,844	[28] [28] [28]
Ag (техническое)	293	0,5—1,1	—0,897	[29]
Ag (99,9%)	83 173 273 573 873	0,54 0,54 0,54 0,54 0,54	—0,925 —0,902 —0,909 —0,949 —1,002	[30] [30] [30] [30] [30]
Ag (отожженное)	300 150 50 40 4	0—1,5 0—1,5 0—1,5 0—1,5 0—1,5	—0,89 —0,88 —0,97 —1,13 —1,12	[32] [32] [32] [32] [32]
Cd (99,9%)	293	0,310—0,842	+0,531	[34]
In	297 78	1,7—1,8 0,6—2,0	—0,073 —0,105	[1] [37]
Sn	294,7	0,300—0,812	—0,022	[38]
Cs	268	0,337—1,86	—7,8	[2]

Металл	T, °K	B, вб/м ²	R, 10 ⁻¹⁶ м ² /К	Лите- ратура
La (99,8%)	293	0,56	-0,8	[9]
Ce (99,88%)	293	0,56	+1,81	[9]
Pr(99,9%)	293	0,56	+0,709	[9]
Nd (99,98)	293	0,56	+0,971	[9]
Sm	213	0-0,55	-0,08	[13]
	300	0-0,55	-0,21	[13]
Sm $\left(\frac{\rho_{273^\circ\text{K}}}{\rho_{4,2^\circ\text{K}}} = 17,3\right)$	4,2	—	+1,5	[14]
	30	—	+2,8	[14]
	170	—	0	[14]
	300	—	-0,5	[14]
Tm	60	0-0,55	-3,4	[13]
	120	0-0,55	-2,4	[13]
	180	0-0,55	-1,9	[13]
	300	0-0,55	-1,5	[13]
Yb	77	0-0,55	3,8	[13]
	180	0-0,55	3,75	[13]
	300	0-0,55	3,7	[13]
Lu	60	0-0,55	-0,55	[13]
	180	0-0,55	-0,54	[13]
	300	0-0,55	-0,53	[13]
Lu (монокристалл $\frac{\rho_{293^\circ\text{K}}}{\rho_{4,2^\circ\text{K}}} = 25$)	См. рис. 26.3 [11]			
Hf (99,4%)	4,2	—	-0,26	[19]
	100	—	+0,19	[19]
	200	—	+0,30	[19]
	300	—	+0,42	[19]
Ta (99,8%)	83	0,54	+0,975	[8]
	273	0,54	+0,971	[8]
	773	0,54	+0,967	[8]
W	297	1,7-1,8	+1,18	[1]
W (99,9%)	83	0,54	+1,20	[8]
	173	0,54	+1,06	[8]
	273	0,54	+1,11	[8]
	873	0,54	+1,56	[8]
Re	293	4,82	+3,15	[25]
Re $\left(\frac{\rho_{293^\circ\text{K}}}{\rho_{4,2^\circ\text{K}}} = 27\right)$	100	0-1,5	+0,4	[18]
	200	0-1,5	+0,9	[18]
	300	0-1,5	+1,6	[18]
Ir	293	0,5-1,1	+0,402	[29]
Pt	293	0,5-1,1	-1,27	[29]

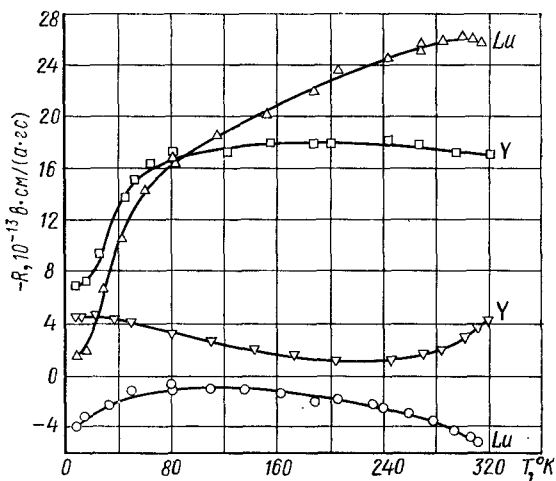


Рис. 26.3. Температурная зависимость коэффициента Холла R для монокристаллических образцов лутетия и иттрия [11]:

△ — Lu (H || оси c); □ — Y (H || оси c); ○ — Lu (H || оси a);
▽ — Y (H || оси b).

Продолжение табл. 26.2

Металл	T, °K	B, вб/м ²	R, 10 ⁻¹⁰ м ² /К	Лите- ратура
Pt (99,9%)	83	0,54	0,203	[30]
	173	0,54	-0,181	[30]
	273	0,54	-0,214	[30]
	573	0,54	-0,253	[30]
	873	0,54	-0,278	[30]
Au	290	0,87-0,92	-0,705	[28]
	345	0,87-0,92	-0,696	[28]
Au (отожженное)	300	0-1,5	-0,73	[32]
	150	0-1,5	-0,72	[32]
	50	0-1,5	-0,73	[32]
	40	0-1,5	-0,84	[32]
	4	0-1,5	-0,98	[32]
Au (99,9%)	83	0,54	0,715	[30]
	123	0,54	-0,697	[30]
	273	0,54	-0,695	[30]
	573	0,54	-0,721	[30]
	873	0,54	-0,755	[30]
Hg	293	1,0-2,24	<0,02	[35]
Tl	297	1,7-1,8	+0,240	[1]
Pb	2,8	0,034*	<+0,06	[40]
	2,8	1,13	+0,13	[40]
	4,2	0,034*	<+0,06	[40]
	4,2	0,10	+0,08	[40]
	4,2	0,50	+0,08	[40]
	4,2	1,13	+0,18	[40]
Th	293	0,37-0,45	-1,2	[20]
U	293-573	0,5-1,7	+0,34	[23]

* В скобках указана чистота металла.

** H || гексагональной оси.

*** H ⊥ гексагональной оси.

4* В сверхпроводящем состоянии.

Таблица 26.3

Коэффициенты Холла для
монокристаллических образцов [41]

Металл	$T, ^\circ K$	$B, \text{вб/м}^2$	Номер крист. талла*	$R_{\parallel}, 10^{-10} \text{ м}^3/\text{К}$ ($B \parallel [0001]$)	$R_{\perp}, 10^{-10} \text{ м}^3/\text{К}$ ($B \perp [0001]$)
Zn	77	1,35	1	+1,87	+0,16
	77	1,35	4	+2,01	+0,18
	77	1,35	5	+1,86	+0,19
	288	1,35	1	+1,44	+0,04
	288	1,35	4	+1,43	-0,06
	288	1,35	5	+1,44	-0,025
Cd	77	1,35	1	+1,66	+0,38
	77	1,35	3	+1,74	+0,27
	288	1,35	1	+1,20	+0,11
	288	1,35	3	+1,32	0

* В работе [41] измерения эффекта Холла были проведены на нескольких образцах. Дан номер кристалла.

Таблица 26.4

Коэффициенты Холла для жидких
металлов и сплавов

Металл	$R, 10^{-11} \text{ м}^3/\text{К}$	Литература
Ga	-4,1	[42]
	-3,9	[45]
	-3,83	[44]
In	-5,4	[42]
	-5,3	[44]
In ₂ Bi	-4,6	[42]
Sn	-4,4	[42]
	-4,4	[44]
Hg	-7,6	[42]
	-7,46	[43]
	-7,6	[44]
Сплав 58% Hg + 42% Sn	-6,75	[42]
Сплав 36% Hg + 64% Sn	-6,2	[42]

Таблица 26.5

Коэффициенты Холла для различных
сплавов

Сплав	Атомное содержание компонента, %	$T, ^\circ K$	$R, 10^{-10} \text{ м}^3/\text{К}$	Литература
Mg—Li	Li			
	0	293	-0,842	[46]
	0,49	293	-0,683	[46]
	2,55	293	-0,173	[46]
	4,42	293	+0,113	[46]
Mg—Al	Al			
	0,29	293	-0,787	[46]
	0,80	293	-0,707	[46]
	1,31	293	-0,653	[46]
	2,18	293	-0,667	[46]
	2,41	293	-0,669	[46]
Mg—Ag	Ag			
	0,11	293	-0,801	[46]
	0,22	293	-0,770	[46]
	0,33	293	-0,734	[46]
	0,528	293	-0,676	[46]
	0,998	293	-0,606	[46]
Mg—Cd	Cd			
	0,55	293	-0,708	[46]
	1,92	293	-0,487	[46]
	3,92	293	-0,290	[46]
	8,64	293	+0,072	[46]
	12,68	293	+0,319	[46]
Mg—In	In			
	0,446	293	-0,731	[46]
	1,46	293	-0,619	[46]
	6,76	293	-0,984	[46]
	10,57	293	-1,456	[46]
Mg—Ti	Ti			
	1,32	293	-0,362	[46]
	2,94	293	-0,173	[46]
	4,84	293	-0,271	[46]
Mg—Sn	Sn			
	0,047	293	-0,837	[46]
	0,29	293	-0,749	[46]
	1,08	293	-0,865	[46]

Продолжение табл. 26.5

Сплав	Атомное содержание компонента, %	T, °K	R, 10 ⁻¹⁰ М²/К	Литература
Mg—Pb	Pb			
	0,24	293	—0,798	[46]
	1,32	293	—0,732	[46]
	2,01	293	—0,724	[46]
Al—Cu*	3,93 Cu	293 ^{3*}	—0,274	[47]
	0,005 Si 0,03 Fe	293 ^{4*}	—0,196	[47]
Al—Ag ^{2*}	Ag			
	0	291,7	—0,350	[48]
	10,02	291,7	—0,340	[48]
	30,01	292,2	—0,301	[48]
Al—Ag	50,19	290,7	—0,228	[48]
	70,23	290,7	—0,045	[48]
	80,60	290,7	+0,139	[48]
	90,41	291,4	—0,305	[48]
Al—Si*	0,52 Si	293	—0,316	[47]
	1,00 Fe			
	0,018 Cu			
Pd—Ti	Ti			
	0	293	—1,15	[49]
	4,94	293	—2,21	[49]
Pd—Re	Re			
	0,7	293	—1,32	[49]
	2,09	293	—1,69	[49]
	2,91	293	—2,11	[49]
Pd—Ag	Ag			
	20	4,25*	—3,52	[50]
	20	776*	—2,87	[50]
	20	2986*	—2,01	[50]
	40	4,25*	—4,30	[50]
	40	776*	—3,77	[50]
	40	3026*	—3,10	[50]

* B=1,7 вб/М².

2* B=0,307—0,829 вб/М².

3* Медленное охлаждение.

4* Резкое охлаждение.

Продолжение табл. 26.5

Сплав	Атомное содержание компонента, %	T, °K	R, 10 ⁻¹⁰ М²/К	Литература
Cu—Pd	Pd			
	157*	293	—0,871	[51]
	158*	293	—0,270	[51]
	257*	293	—1,668	[51]
	447*	293	—3,22	[51]
Cu—Au	AuCu ₃ ^{7*}	293	—0,645	[52]
	AuCu ₂ ^{8*}	293	+0,326	[52]
	AuCu ^{7*}	293	—0,736	[52]
	AuCu ^{8*}	293	—0,382	[52]
Cu—Zn	Cu			
	0	293	+0,830	[53]
	6	293	+0,496	[53]
	67	293	—0,116	[53]
	81,3	293	—0,404	[53]
	100	293	—0,520	[53]
Cu—Cd ^{9*}	Cu			
	0	290,0	+0,530	[54]
	13,3	288,7	—1,379	[54]
	20,9	287,4	—0,986	[54]
	30,5	288,1	—0,683	[54]
	100	288,4	—0,523	[54]
Cu—Sn	Cu			
	0 ^{10*}	294,7	—0,022	[38]
	9,88 ^{11*}	295,7	—0,107	[38]
	39,60 ^{12*}	291,7	—0,209	[38]
	69,70 ^{12*}	290,7	+0,470	[38]
	100 ^{12*}	290,2	—0,524	[38]
Mo—Nb	Nb			
	0	290	+1,85	[57]
	0	4,2	+2,61	[57]
	7,9	290	+2,82	[57]
	7,9	80	+3,43	[57]
	7,9	4,2	+3,64	[57]

5* B=0,4—1,7 вб/М².

6* B=0,7—2,3 вб/М².

7* Разупорядоченный сплав.

8* Упорядоченный сплав.

9* B=0,3—0,85 вб/М².

10* B=0,749—0,812 вб/М².

11* B=0,552—0,812 вб/М².

12* B=0,300—0,812 вб/М².

Сплав	Атомное содержание компонента, %	T, °K	R, 10 ⁻¹⁰ м ³ /K	Литература
Mo—Re	Re			
	7,4	290	+1,40	[57]
	7,4	80	+1,00	[57]
	7,4	4,2	+0,82	[57]
Pd—Ta	Ta			
	3,03	250	+1,45	[58]
	4,89	250	+1,78	[58]
	6,18	250	+1,83	[58]
Hf—Sc	Sc			
	0	250	—0,25	[58]
	33	250	—0,73	[58]
	45	250	—0,90	[58]
	70	250	—1,60	[58]
Ag—Sn	Ag			
	5,62*	290,2	+0,02	[55]
	30,43**	289,0	+0,278	[55]
	81,00**	292,2	—0,275	[55]
	100 3*	289,2	—0,892	[55]

Сплав	Атомное содержание компонента, %	T, °K	R, 10 ⁻¹⁰ м ³ /K	Литература
Ag—Zn	Zn			
	50 (β-фаза)	290	—0,06	[61]
	50 (γ-фаза)	290	+0,06	[61]
Au—Zn	Zn			
	50	290	+0,11	[61]
Au ₃ —Mn		130	+0,33	[56]
		180	+0,26	[56]
		230	+0,25	[56]

* B = 0,835 вб/м².
 ** B = 0,600—0,835 вб/м².
 *** B = 0,309—0,835 вб/м².
 Для сплавов Al—Cu, Al—Ag, Al—Si, Cu—Zn, Cu—Au, Pd—Ag, Cu—Cd, Cu—Sn, Ag—Sn — содержание компонента дано в %.

Таблица 26.6

Терромагнитные коэффициенты для металлов

Металл	T, °K	B, вб/м ²	P, 10 ⁻⁸ $\frac{\text{град} \cdot \text{м}^3}{\text{в} \cdot \text{К}}$	S, 10 ⁻³ $\frac{\text{м}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$	Q, 10 ⁻⁸ $\frac{\text{м}^2}{\text{град} \cdot \text{сек}}$	Литература
Ag (технический)	323	0,5—1,4	—	—4,04	—4,3	[29]
Al (99,5%)	313	2,27	—	—0,63	+0,39	[7]
Mn (99,99%)	330	—	—	—	+0,15	[24]
Cu	298,2	1,13—1,14	—1,446	—2,698	—2,155	[31]
	328,2	1,13—1,14	—1,544	—2,448	—2,104	[31]
	358,2	1,13—1,14	—1,674	—2,272	—2,014	[31]
Zn (технический)	323	0,5—1,1	—	+1,29	—2,40	[29]
	319,6	0,8—2,1	—	+1,05	—1,27	[7]
	347,6	0,8—2,1	—	+0,97	—1,38	[7]
	401,5	0,8—2,1	—	+0,82	—1,25	[7]

Металл	$T, ^\circ\text{K}$	$B, \text{бб/м}^2$	$P, 10^{-8} \frac{\text{град} \cdot \text{м}^3}{\text{в} \cdot \text{к}}$	$S, 10^{-3} \frac{\text{м}^2}{\text{в} \cdot \text{сек}}$	$Q, 10^{-8} \frac{\text{м}^2}{\text{град} \cdot \text{сек}}$	Литература
Mo	333	1,7—1,8	—	—	—1,72	[1]
Pd	299	0,87—0,92	+16,2	—0,487	+3,27	[28]
	318	0,87—0,92	+17,8	—0,414	+3,26	[28]
	337	0,87—0,92	+20,6	—0,378	+3,35	[28]
Cd	337	1,122	—	+1,1	—	[22]
	320	—	—	+0,89	—1,20	[33]
Y	298	2,5	$75 \cdot 10^4$	—	—	[12]
In	333	1,7—1,8	—	—	+0,32	[1]
Sn	330	1,4	—	—	—0,04	[39]
Ta (99,8%)	83	0,54	—	—	+0,98	[8]
W	333	1,7—1,8	—	—	—10	[1]
	332	1,22	—	+1,5	—	[22]
Ir	323	0,5—1,1	—	+0,55	—0,05	[29]
Pt	323	0,5—1,1	—	—0,21	—	[29]
Au	298	0,87—0,92	—	—3,00	—1,81	[28]
	330	0,87—0,92	—	—2,63	—1,81	[28]
Tl	333	1,7—1,8	—	—	—0,37	[1]
Pb	330	1,4	—	—	—0,05	[39]

26.3. ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МЫШЬЯКЕ, ВИСМУТЕ, СУРЬМЕ И ИХ СПЛАВАХ

Коэффициенты гальвано- и термомагнитных эффектов в As, Bi и Sb отличаются от коэффициентов других металлов относительно большими значениями и сложной температурной зависимостью.

В As и Bi кроме необычной температурной зависимости поперечный эффект зависит еще и от магнитной индукции. При низких температурах наблюдается осцилляция эффекта Холла (эффект Де Гааза — ван Альфена). Периодическая зависимость коэффициента Холла от обратной магнитной индукции представлена в следующем виде:

$$R(B, T) = \sum_i \left\{ C_i(B, T) + D_i(B, T) \times \right. \\ \left. \times \sin \left(2\pi \left(\frac{E_0}{\beta} \right)_i \frac{1}{B} - \theta_i \right) \right\},$$

где суммирование производится по носителям различного типа. Здесь B — магнитная индукция; T — абсолютная температура; R — общий коэффициент Холла; C — монотонная часть коэффициента Холла; D — амплитуда осцилляторной части коэффициента Холла; β/E_0 — период осцилляции; θ — фаза; E_0 — энергия Ферми; $\beta = eh/m^*c$ — эффективный магнетон Бора; m^* — соответствующая эффективная масса носителей.

Коэффициенты гальвано- и термомагнитных явлений в мышьяке, висмуте и сурьме

Металл	$T, ^\circ K$	$B, \frac{вб}{м^2}$	$R, 10^{-7} \frac{м^3}{К}$	$P, 10^{-8} \frac{град \cdot м^3}{(в \cdot К)}$	$S, 10^{-2} \frac{м^2}{(в \cdot сек)}$	$Q, 10^{-6} \frac{м^2}{град \cdot сек}$	Литература
As	293	0,4 и 0,8	+0,0452	+0,175	+0,415	+0,225	[59]
Sb (99,916%)	291	0,8	+0,219	+1,94	+2,01	+1,76	[60]
	296	1,10		+3,66			[1]
	325	1,10			+2,62		[22]
	291*	0,309—0,683	+0,213	—	—	—	[63]
	289,5 ^{2*}	0,309	+0,232	—	—	—	[63]
	289,5	0,463	+0,232	—	—	—	[63]
	289,5	0,579	+0,234	—	—	—	[63]
	289,5	0,683	+0,232	—	—	—	[63]
Bi	291	0,266	—	—	—	+12,5	[60]
	291	0,393	—6,33	+35,3	—2,05	+17,8	[60]
	291	0,629	—5,80	+51,6	—1,12	+23,4	[60]
	291	0,830	—5,28	+58,3	—0,55	+26,1	[60]
	291	1,057	—4,82	+62,7	—0,19	+27,5	[60]
	325	1,04	—	—	—	+20	[64]
	325	1,09	—	—	—4,05	—	[22]

* Мелкокристаллическая

2* Крупнокристаллическая

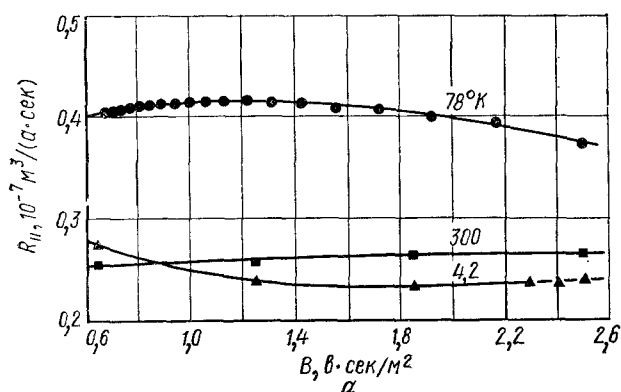


Рис. 26.4. Зависимости коэффициента Холла R_H монокристалла Sb от магнитной индукции [65] (а) и от обратного значения магнитной индукции [65] (б). Тригональная ось перпендикулярна плоскости пластинки (т. е. параллельна магнитному полю). Угол между бинарной осью и осью вдоль длины пластинки (направление первичного тока) составляет 15° .

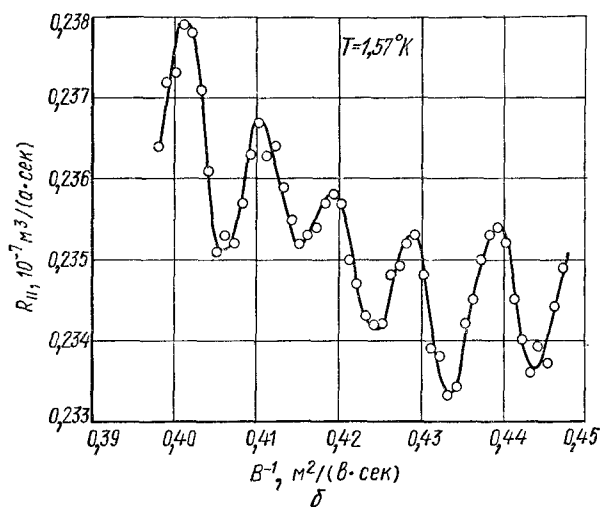


Таблица 26.8

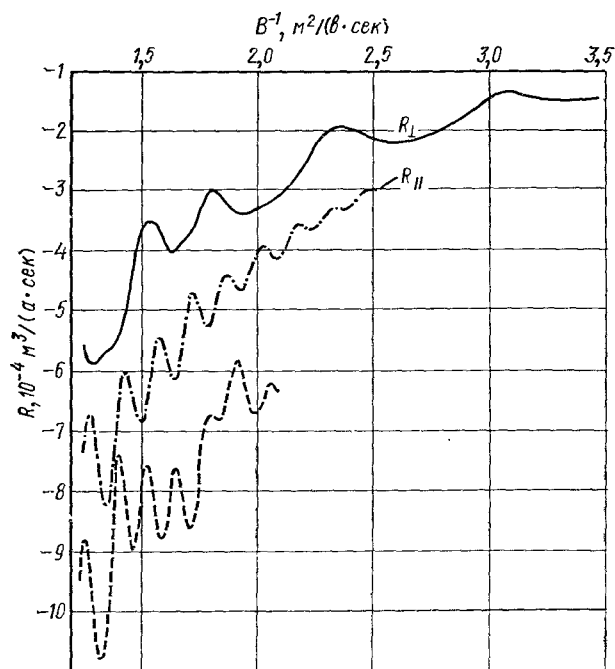


Рис. 26.5. Зависимость коэффициентов Холла ($R_{\perp}$ и $R_{\parallel}$) монокристалла висмута от обратного значения магнитной индукции при $T = 1,4^\circ \text{K}$ [71]:

— — — угол между направлением магнитного поля и тригональной осью 25° , первичный ток параллелен бинарной оси; — — — магнитное поле параллельно тригональной оси, — — — магнитное поле перпендикулярно тригональной оси.

Коэффициенты Холла монокристаллических образцов Bi (экстраполированный коэффициент Холла при $B = 0$)

$T, ^\circ\text{K}$	$R_{\perp}^*, 10^{-2} \text{ M}^3/\text{K}$	$R_{\parallel}^{2*}, 10^{-2} \text{ M}^3/\text{K}$	Литература
20	-180	—	[66]
65	-103	+6	[66]
90	-80	+3	[66]
125	-57	+2	[66]
168	-38	+1	[66]
230	-22	0	[66]
290	-15	0	[66]
113	-59	+1,7	[67]
203	-27,4	+0,9	[67]
273	-16,9	+0,6	[68]
318	-12,1	+0,6	[68]

* $B \perp$ к тригональной оси.

2* $B \parallel$ тригональной оси.

Таблица 26.9

Осцилляция эффекта Холла в Bi

Чистота кристалла $\rho_{42^\circ\text{K}}$ $\rho_{273^\circ\text{K}}$	$P, \text{ атм}$	$T, ^\circ\text{K}$	$B, \text{ вб/м}^2$	Монотонная часть S , $10^{-4} \text{ M}^3/\text{K}$		Осцилляция		Литература
				*	2*	Период $\beta/E_0, \text{ M}^2/\text{вб}$	Фаза θ	
$1,7 \cdot 10^{-3}$	—	14	1,8	-6,5	—	—	—	[69]
$1,7 \cdot 10^{-3}$	—	1,4—4,2	0,3	-4	—	0,4	—	[70]
$1,7 \cdot 10^{-3}$	—	—	1,4	-26	—	—	—	[70]
$> 99,996\%$ $5 \cdot 10^{-3}$	—	1,38—4,2	0,2—0,8	—	—	0,15	—	[71, 72]
99,99%	6,8	4,2	0,840	—	-9,22	—	—	[73]
	6,8	4,2	0,968	—	-11,00	0,157	$1,47 \frac{\pi}{4}$	[73]
	6,8	4,2	1,146	—	-13,26	—	—	[73]
	114	4,2	0,840	—	-9,30	—	—	[73]
	114	4,2	0,968	—	-11,08	0,159	$1,77 \frac{\pi}{4}$	[73]
	114	4,2	1,146	—	-13,35	—	—	[79]

* $B \perp$ к тригональной оси.

2* $B \parallel$ тригональной оси.

Таблица 26.10

Коэффициенты Холла в различных сплавах Sb

Добавляемый металл	Содержание, %	$T, ^\circ\text{K}$	$B, \text{вб/м}^2$	$R, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{К}$	Литература
Ag	0	288	0,464	224	[75]
	2,25	288	0,464	222	[75]
	13,78	286	0,464	216	[75]
	50,07	290	0,464	166	[75]
	70,74	289,5	0,464	-1,213	[75]
	89,20	289,5	0,464	-0,864	[75]
	100	289	0,464	-0,898	[75]
Cu	20	289	0,3—0,85	+67,6	[74]
	30	288,1	0,3—0,85	+32,3	[74]
	40	289,2	0,3—0,85	+13,6	[74]
	51,4	294,9	0,3—0,85	+1,50	[74]
	70	291,3	0,3—0,85	+0,111	[74]
	80	296,0	0,3—0,85	-0,324	[74]
Pb	0	291,0	0,305—0,847	+213	[63]
	15	291,0	0,305—0,847	+87,6	[63]
	30	293,5	0,305—0,847	+33,3	[63]
	50	293,5	0,305—0,847	+11,2	[63]
	96	293,5	0,305—0,847	+0,997	[63]
Te	4,26	293	—	140	[75]
Tl	81	293	—	0,5	[76]
	85,4	293	—	10	[76]

Таблица 26.11

Коэффициенты Холла в сплавах Bi с малыми добавками других элементов

Добавляемый элемент	Атомное содержание, %	$T, ^\circ\text{K}$	$R, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{К}, \text{ при } B, \text{вб/м}^2$		Литература
			0,36	2,32	
S	0	293	-6,8	-4,08	[77]
Zn	1	293	-7,0	—	[77]
Ga	0,33	293	-6,4	—	[77]
As	0,5	293	-6,8	—	[77]
As	1	293	-6,0	-5,8	[77]
Se	1	293	-5,0	—	[77]
Cd	0,33	293	-6,5	—	[77]
In	0,5	293	-6,9	—	[77]
Sn	1	293	-2,8	+0,25	[77]
Sb	1	293	-7,2	-4,83	[77]
Te	1	293	-0,6	—	[77]
I	0,5	293	-6,7	—	[77]
Hg	0,33	293	-6,7	—	[77]
Tl	0,5	293	-6,8	—	[77]
Pb	1	293	-6,4	—	[77]
As	0,1	293	-7,3	—	[78]
	0,25	293	-6,3	—	[78]
	0,5	293	-5,95	—	[78]
	0,75	293	-5,85	—	[78]
Te	0,01	293	-6,25	-4,2	[78]
	0,05	293	-3,92	-3,37	[78]
	0,10	293	-2,38	-2,22	[78]
	0,25	293	-1,235	-1,23	[78]
	0,50	293	-0,59	-0,63	[78]
Pb—Se	Pb 0,5; Se 0,5	293	-6,71	-4,57	[78]

Таблица 26.12

Коэффициенты Холла в сплавах Bi с большим количеством примесей

Сплав	Примесь, %	$T, ^\circ\text{K}$	$B, \text{вб/м}^2$	$R, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{К}$	Литература
Bi—Cd	1	$289 < T < 296$	0,842	-3,78	[79]
	10	$289 < T < 296$	0,842	-1,22	[79]
	40	$289 < T < 296$	0,842	-1,06	[79]
	85,1	$289 < T < 296$	0,842	0,0009995	[79]
Bi—Sn	0,2	$285 < T < 288$	0,842	-0,106	[80]
	1	$285 < T < 288$	0,842	+0,395	[80]
	4	$285 < T < 288$	0,842	+0,287	[80]
	12	$285 < T < 288$	0,842	+0,0903	[80]
	32	$285 < T < 288$	0,842	+0,00470	[80]
	63	$285 < T < 288$	0,842	+0,000621	[80]
Bi—Tl	30	293	—	$160 \cdot 10^{-3}$	[76]
	37	293	—	$1,7 \cdot 10^{-3}$	[76]
	44	293	—	$1,1 \cdot 10^{-3}$	[76]
Bi—Pb	1	$286 < T < 293$	0,894	-1,4	[81]
	2	$286 < T < 293$	0,894	-0,222	[81]
	2,7	$286 < T < 293$	0,894	+0,832	[81]
	3	$286 < T < 293$	0,894	+1,1	[81]
	4	$286 < T < 293$	0,894	-0,267	[81]
	10	$286 < T < 293$	0,894	+0,0932	[81]
	20	$286 < T < 293$	0,894	+0,0577	[81]
	30	$286 < T < 293$	0,894	+0,0180	[81]
	40	$286 < T < 293$	0,894	-0,00103	[81]
	50	$286 < T < 293$	0,894	-0,000739	[81]

26.4. ГАЛЬВАНО-И ТЕРМОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ

Таблица 26.13

Гальваномагнитные коэффициенты железа и кобальта. Значения термомагнитных коэффициентов см. в списках

Металл	$T, ^\circ\text{K}$	$10^{-8} \frac{E}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$	$B, \text{вб/м}^2$	$R, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{К}$	Литература
Fe	299	—	0,3—1,7	+5,5	[82]
См. рис. 26.6, 26.9,	313*	11,65	2,3	+6,43	[83]
	323**	13,21	2,3	+7,27	[83]
	333**	12,77	2,3	+8,10	[83]
	343**	13,33	2,3	+8,94	[83]
26.11	14,23	1,090	0,1—2	+0,350	[84]
	20,37	1,103	0,1—2	+0,345	[84]
	63,8	1,491	0,1—2	+0,286	[84]
	83	1,809	0,1—2	+0,330	[84]
	293	11,11	0,1—2	+6,98	[84]

Металл	T, °K	$10^{-8} \rho_{\text{ом-м}}$	B, вб/м ²	$R_1, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{К}$	Литература
Железо электро- литиче- ское	79	1,07	0,1—2,7	+0,130	[85]
	101	2,03	0,1—2,7	+0,347	[85]
	145	3,08	0,1—2,7	+0,860	[85]
	198	6,01	0,1—2,7	+2,04	[85]
	254	8,74	0,1—2,7	+4,07	[85]
	308	11,9	0,1—2,7	+7,36	[85]
	388	17,0	0,1—2,7	+14,8	[85]
	483	23,7	0,1—2,7	+28,0	[85]
	587	32,7	0,1—2,7	+49,5	[85]
	689	43,7	0,1—2,7	+84,2	[85]
	792	57,7	0,1—2,7	+133	[85]
	843	65,7	0,1—2,7	+162	[85]

Железо Армко	286 ^{5*}	—	0,2—3	+6,31	[86]
-----------------	-------------------	---	-------	-------	------

Со	83	—	0,1—1,6	+1,51	[87]
----	----	---	---------	-------	------

См. рис.	296 ^{6*}	—	0,4—2,1	+5,88	[87]
26,8,	373	—	0,1—1,6	+8,65	[87]
26,9,	457	—	0,1—1,5	+13,6	[87]
26,10	573	—	0,1—1,5	+21,2	[87]
	789	—	0,1—1,5	+48,3	[87]
	933	—	0,1—1,5	+89,4	[87]
	1113	—	0,1—1,5	+158	[87]
	1233	—	0,2—1	+200	[87]
	1303	—	0,86	+170	[87]
	1373	—	0,86	+60	[87]

	3007*	—	0,2—1,3	+5,88	[88]
	4008*	—	0,2—1,3	+10,0	[88]
	5009*	—	0,2—1,3	+16,0	[88]
	60010*	—	0,2—1,3	+24,6	[88]
	70011*	—	0,2—1,3	+35,0	[88]
	80012*	—	0,2—1,3	+46,8	[88]

< 1% примесей	29213*	—	0,9—0,95	+3,55	[89]
	29814*	—	0,9—0,95	+3,72	[89]
	32115*	—	0,9—0,95	+4,44	[89]
	287*	—	0,2—3	+0,19	[90]

* $P_1 = -20,3 \cdot 10^{-8} \text{ град} \cdot \text{м}^2/(\text{в} \cdot \text{К})$; $S_1 = 3,28 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/(\text{в} \cdot \text{сек})$;
 $Q_1 = -20,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град} \cdot \text{сек})$; [83].
^{26*} $P_1 = -20,8 \cdot 10^{-8} \text{ град} \cdot \text{м}^2/(\text{в} \cdot \text{К})$; $S_1 = 3,39 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/(\text{в} \cdot \text{сек})$;
 $Q_1 = -20,6 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град} \cdot \text{сек})$; [83].
^{38*} $P_1 = -21,4 \cdot 10^{-8} \text{ град} \cdot \text{м}^2/(\text{в} \cdot \text{К})$; $S_1 = 3,50 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/(\text{в} \cdot \text{сек})$;
 $Q_1 = -20,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град} \cdot \text{сек})$; [83].
^{48*} $P_1 = -22,10^{-8} \text{ град} \cdot \text{м}^2/(\text{в} \cdot \text{К})$; $S_1 = 3,61 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/(\text{в} \cdot \text{сек})$;
 $Q_1 = -21 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град} \cdot \text{сек})$; [83].
^{56*} $R_0 = 0,247 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{К}$ [86].
^{68*} $R_0 = 0,4 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{К}$ [87], $R_0 = 1,33 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{К}$ [90].
^{78*} $Q_1 = 18 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град} \cdot \text{сек})$ [88].
^{88*} $Q_1 = 27 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град} \cdot \text{сек})$ [88].
^{108*} $Q_1 = 40 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град} \cdot \text{сек})$ [88].
^{118*} $Q_1 = 57 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град} \cdot \text{сек})$ [88].
^{128*} $Q_1 = 78 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град} \cdot \text{сек})$ [88].
^{138*} $Q_1 = 100 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град} \cdot \text{сек})$ [88].
^{148*} $P_1 = 81 \cdot 10^{-8} \text{ град} \cdot \text{м}^2/(\text{в} \cdot \text{К})$; $S_1 = 3,77 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/(\text{в} \cdot \text{сек})$;
 $Q_1 = 19 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град} \cdot \text{сек})$ [89].
^{158*} $P_1 = 109 \cdot 10^{-8} \text{ град} \cdot \text{м}^2/(\text{в} \cdot \text{К})$; $S_1 = 4,32 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/(\text{в} \cdot \text{сек})$;
 $Q_1 = 22 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град} \cdot \text{сек})$ [89].

Гальваномагнитные коэффициенты никеля. Значения термодинамических коэффициентов см. в сносках

Металл	T, °K	$\rho, 10^{-8} \text{ ом} \cdot \text{м}$	B, вб/м ²	$R_0, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{К}$	$R_1, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{К}$	Литература
Ni (техни- чески чистый) См. рис.	313*	12,15	0,667	—	—15,3	[83]
	323 ^{2*}	12,63	0,667	—	—16,0	[83]
	333 ^{3*}	13,04	0,667	—	—16,6	[83]
	343 ^{4*}	13,46	0,667	—	—17,2	[83]
	26,7, 26,9, 26,12					

Ni (электро- литиче- ский)	14,20	0,391	0,1—2	—0,306	—0,568	[84]
	20,37	0,407	0,1—2	—0,301	—0,554	[84]
	63,3	0,821	0,1—2	—0,327	—0,615	[84]
	83,0	1,125	0,1—2	—0,35	—0,845	[84]
	293	7,74	0,1—2	—0,55	—7,33	[84]

Ni (техниче- ски чнс- тый)	81	4,15	0,1—2,7	—	—3,54	[85]
	101	4,69	0,1—2,7	—	—4,06	[85]
	157	6,30	0,1—2,7	—	—5,71	[85]
	207	7,88	0,1—2,7	—	—7,50	[85]
	249	9,39	0,1—2,7	—	—9,49	[85]
	307	11,9	0,1—2,7	—	—13,2	[85]
	408	17,4	0,1—2,7	—	—22,4	[85]
	484	22,5	0,1—2,7	—	—31,9	[85]
	536	26,4	0,1—2,7	—	—38,7	[85]
	569	29,2	0,1—2,7	—	—41,8	[85]
	612	32,9	0,1—2,7	—	—37,3	[85]

Примеси: Со 0,23% Си 0,12%	282	—	0,2—3	—0,56	—5,21	[90]
----------------------------------	-----	---	-------	-------	-------	------

Ni (99,99%) ^{5*}	293	7	0,6	—	—7,3	[91]
------------------------------	-----	---	-----	---	------	------

$\frac{\rho_{4,2^\circ\text{K}}}{\rho_{293^\circ\text{K}}} =$	293	—	2,2	—0,64	—6,92	[92]
$= 10,3 \cdot 10^{-3}$	4	—	—	—0,21	—0,17	[92]

* $P_1 = 67 \cdot 10^{-8} \text{ град} \cdot \text{м}^2/(\text{в} \cdot \text{К})$, $S_1 = -6,87 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/(\text{в} \cdot \text{сек})$;
 $Q_1 = 59,3 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град} \cdot \text{сек})$ [83].
^{29*} $P_1 = 107 \cdot 10^{-8} \text{ град} \cdot \text{м}^2/(\text{в} \cdot \text{К})$, $S_1 = -6,65 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/(\text{в} \cdot \text{сек})$;
 $Q_1 = 66,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град} \cdot \text{сек})$ [83].
^{39*} $P_1 = 127 \cdot 10^{-8} \text{ град} \cdot \text{м}^2/(\text{в} \cdot \text{К})$, $S_1 = -6,47 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/(\text{в} \cdot \text{сек})$;
 $Q_1 = 73,1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град} \cdot \text{сек})$ [83].
^{49*} $P_1 = 148 \cdot 10^{-8} \text{ град} \cdot \text{м}^2/(\text{в} \cdot \text{К})$, $S_1 = -6,28 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/(\text{в} \cdot \text{сек})$;
 $Q_1 = 80 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град} \cdot \text{сек})$ [83].
^{59*} $P_1 = 55 \cdot 10^{-8} \text{ град} \cdot \text{м}^2/(\text{в} \cdot \text{К})$, $S_1 = -4,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/(\text{в} \cdot \text{сек})$;
 $Q_1 = 48,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град} \cdot \text{сек})$ [91].

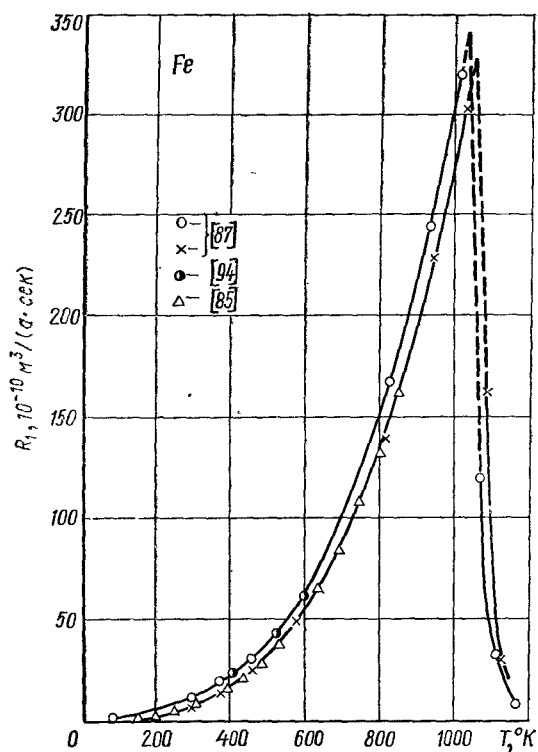


Рис. 26.6. Зависимость аномального коэффициента Холла R_1 железа от температуры.

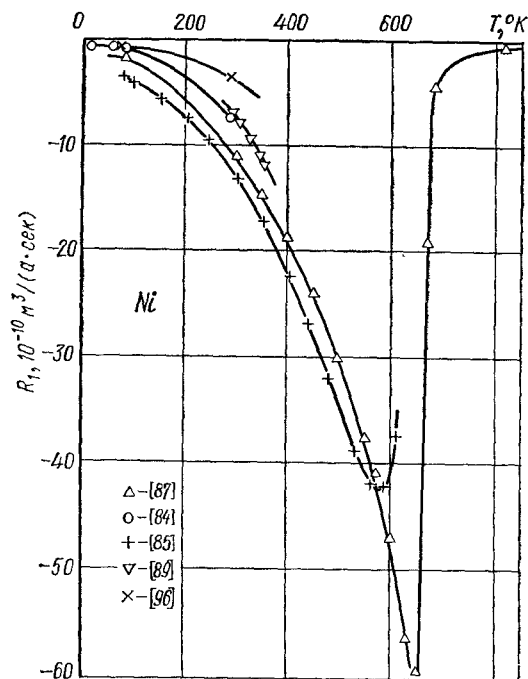


Рис. 26.8. Зависимость аномального коэффициента Холла никеля от температуры.

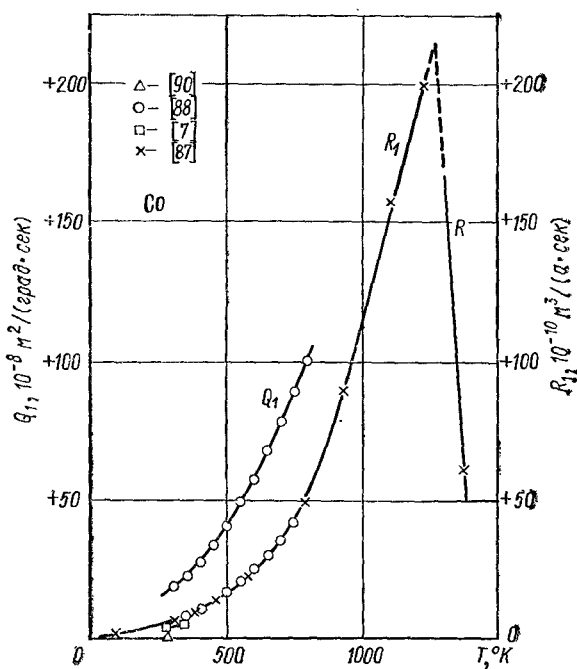


Рис. 26.7. Зависимость аномального коэффициента Холла и аномального коэффициента Эттингсауэна кобальта от температуры.

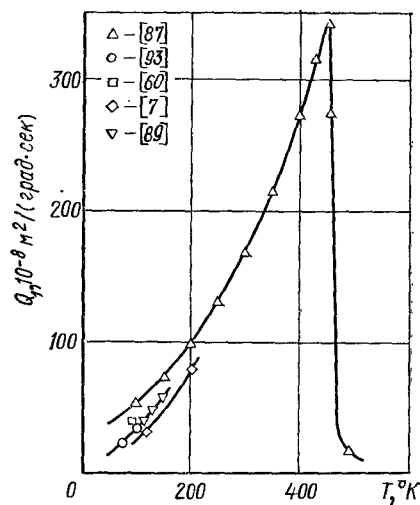


Рис. 26.9. Зависимость аномального коэффициента Эттингсауэна никеля от температуры.

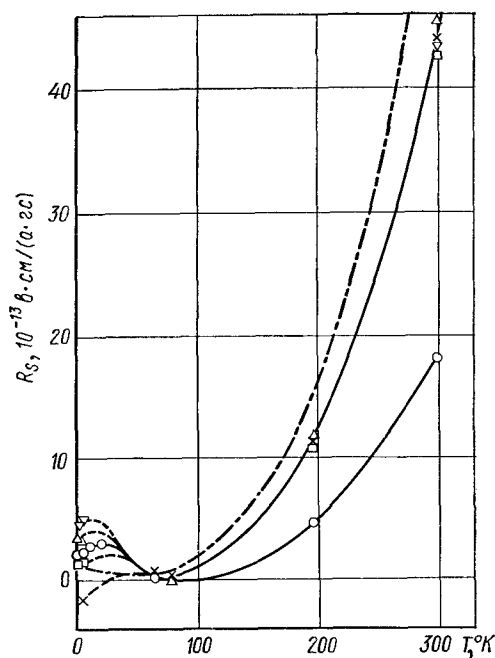


Рис. 26.10. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для усов железа от температуры [98]. (Штрих-пунктирная линия — данные [97] для поликристаллического железа).

Образец	Ось усов железа и направление первичного тока	Направление магнитного поля	Направление %, д. с. Холла	$\gamma = \frac{\rho_{298^\circ\text{K}}}{\rho_{4,2^\circ\text{K}}}$
× ○ △ ▽ □	<111>	<110>	<112>	196
	<111>	<110>	<112>	213
	<100>	<010>	<001>	213
	<100>	<010>	<001>	452
	<100>	<010>	<001>	180

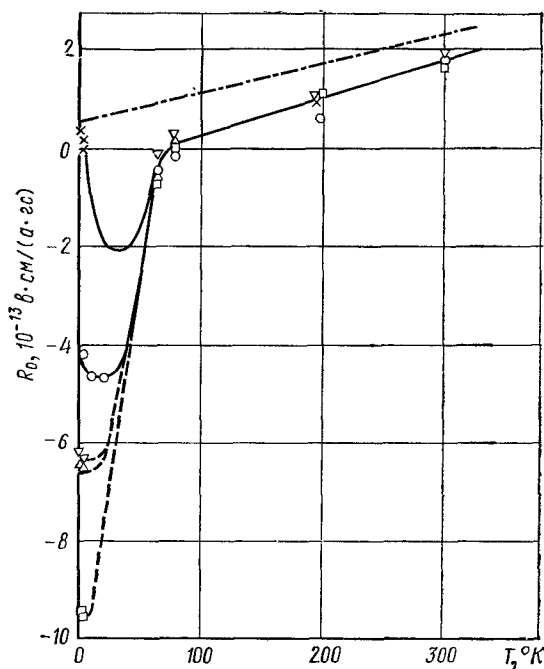


Рис. 26.11. Зависимость обыкновенного коэффициента Холла для усов железа от температуры [98]. Обозначения те же, что на рис. 26.10.

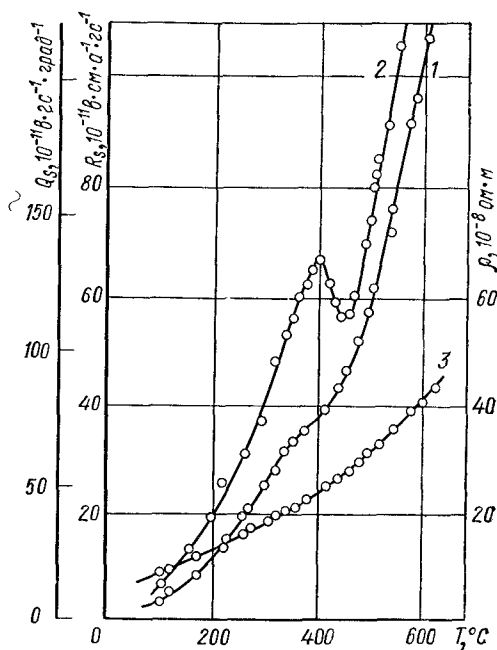


Рис. 26.12. Зависимость ферромагнитных коэффициентов Холла (1) и Нернста — Эттингсгаузен (2) и удельного сопротивления (3) для кобальта от температуры [99].

Гальваномагнитные коэффициенты для сплавов Fe
Значения термомагнитных коэффициентов см. в сносках

Сплав	$T, ^\circ K$	$\rho, 10^{-8} \text{ ом}\cdot\text{м}$	$B, \text{ вб}/\text{м}^2$	$R_0, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{К}$	$R_1, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{К}$	Литература
Fe—Co* Атомное содержание Co, % 33	297	—	1,7—1,8	—	+1,33	[100]
Fe—Ni Массовое содержание Ni, %: 0 ^{2*} 1,07 ^{3*} 7,05 ^{4*} 13,11 ^{5*} 56 ^{6*}	293 293 293 293 293	12,0 14,5 25,2 33,1 29	0,3—2,25 0,3—2,25 0,3—2,25 0,3—2,25 0,3—2,25	— — — — —	+11,2 +16,9 +42,5 +61,5 +46,9	[102] [102] [102] [102] [102]
Атомное содержание Ni, % 33 84	20 290	4,6 14,4	0,6—1,4 0,6—1,4	—2,35 —1,7	—1,95 —0,75	[96] [96]
Массовое содержание Ni, % 45 71,8	301 289	— —	0,25—3 0,25—3	—1,87 —1,88	+87,5 +3,39	[103] [103]
Атомное содержание Ni, % 20 20 20 15 15 15 10 10 10 5 5 5	100 200 300 100 200 300 100 200 300 100 200 300	17 22,5 30 17,5 23 30 15 21 27,5 11 15 22	до 3,3 » 3,3 » 3,3 » 3,3 » 3,3 » 3,3 » 3,3 » 3,3 » 3,3 » 3,3 » 3,3 » 3,3	—1,8 —1,58 —1,4 —1,2 —1,35 —1,18 —0,2 —0,6 —0,3 +0,15 —0,10 0,00	17 26 42 20 29 44 17 27 39 9 17 28	[104] [104] [104] [104] [104] [104] [104] [104] [104] [104] [104] [104] [104]
Fe—Ni	См. рис. 26.14					[105]
Fe—C 323 ^{7*}	293 323 ^{7*}	— —	0,5—1,1 —	— —	+13,36 —	[106] [106]
Массовое содержание C, % 1,18	293	22,67	0,5—3	+5,39	+18,2	[107]
Fe—Si Массовое содержание Si, % 0,25 0,25 0,25 0,25 0,25 3,80	291 314 ^{8*} 402 508 580 292	— — — — — —	0,71 0,1—2,2 0,71 0,71 0,71 0,6	— — — — — —	+11,5 — +23,4 +44,3 +62,3 +152	[94] [94] [94] [94] [94] [94]

* $Q_1=25 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град}\cdot\text{сек})$ [100].2* $Q_1=-9,75 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град}\cdot\text{сек})$ [102].3* $Q_1=-4,21 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град}\cdot\text{сек})$ [102].4* $Q_1=3,06 \text{ м}^2/(\text{град}\cdot\text{сек})$ [102].5* $Q_1=49,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град}\cdot\text{сек})$ [102].6* $Q_1=1,33 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град}\cdot\text{сек})$ [102].7* $S_1=6,87 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{в}\cdot\text{сек})$, $Q_1=-16,6 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град}\cdot\text{сек})$; $P_1=-67 \cdot 10^{-8} \text{ град}\cdot\text{м}^2/(\text{в}\cdot\text{К})$ [106].8* $Q_1=-0,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град}\cdot\text{сек})$ [94].

Сплав	$T, ^\circ\text{K}$	$\rho, 10^{-8} \text{ ом}\cdot\text{м}$	$B, \text{ вб/м}^2$	$R_0, 10^{-10} \text{ м}^3/\text{к}$	$R_1, 10^{-10} \text{ м}^3/\text{к}$	Литература
3,80	311*	—	0,1—2,2	—	—	[94]
3,80	403	—	0,6	—	+175	[94]
3,80	517	—	0,6	—	+208	[94]
3,80	583	—	0,6	—	+226	[94]
Массовое содержание Si, %						
0	298	11,0	—	—	+6,53	[108]
1,3	300	32,5	—	—	+49,7	[108]
3,01	299	46,6	—	—	+95,5	[108]
3,91	298	63,7	—	—	+161	[108]
5,09	300	76,5	—	—	+191	[108]
Fe—Si	См. рис. 26.15					[109]
Fe—Cu						
Массовое содержание Cu, %						
0	293	12,0	0,3—2,25	—	+11,2	[102]
0,804	293	13,6	0,3—2,25	—	+12,2	[102]
2,0	293	13,4	0,3—2,25	—	+19,0	[102]
4,0	293	12,7	0,3—2,25	—	+16,3	[102]
7,05	293	15,8	0,3—2,25	—	+15,2	[102]
Fe—Cr						
Атомное содержание Cr, %						
94,4	77	—	—	—	10,8	[110]
94,4	293	—	—	—	2,5	[110]
90	77	—	—	—	4,6	[110]
90	293	—	—	—	2,6	[110]
85	77	—	—	—	11,6	[110]
85	293	—	—	—	1,9	[110]
70	293	—	—	—	3,8	[110]
0,75	309	14,4	2,109	0,414	11,6	[111]
0,75	231	10,6	2,119	0,924	5,6	[111]
0,75	112	4,8	2,132	0,789	0,542	[111]
0,75	20	2,0	2,137	1,83	2,31	[111]
0,75	4,2	2,0	2,137	1,71	2,63	[111]
2,3	316	21,1	2,064	0,599	22,2	[111]
2,3	231	15,8	2,078	0,402	12,3	[111]
2,3	112	8,3	2,095	1,18	2,78	[111]
2,3	20	4,5	2,101	2,26	6,57	[111]
2,3	4,2	—	2,101	1,75	7,88	[111]
5,1	313	30,4	1,988	0,626	42,8	[111]
5,1	331	2,35	2,00	0,814	22,3	[111]
5,1	1,2	13,8	2,03	1,55	6,19	[111]
5,1	20	—	2,03	2,87	10,6	[111]
5,1	4,2	9,1	2,03	2,23	11,9	[111]

* $Q_1=6,4\cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град}\cdot\text{сек})$ [94].

Сплав	$T, ^\circ\text{K}$	$\rho, 10^{-8} \text{ ом}\cdot\text{м}$	$B, \text{ вб/м}^2$	$R_0, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{К}$	$R_1, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{К}$	Литература
Fe—Cr						
Атомное содержание Cr, %						
12,7	308	42,3	1,74	0,671	64,2	[111]
12,7	231	33,0	1,75	0,887	39,6	[111]
12,7	112	19,1	1,78	1,64	11,8	[111]
12,7	20	13,7	1,79	4,48	7,08	[111]
12,7	4,2	13,7	1,79	4,08	7,90	[111]
25,1	307	47,4	1,42	0,614	73,3	[111]
25,1	231	36,7	1,45	0,808	45,4	[111]
25,1	112	20,4	1,48	1,38	14,6	[111]
25,1	20	13,5	1,49	1,87	6,61	[111]
25,1	4,2	13,4	1,49	2,53	5,05	[111]
FeCr						[122]
FeCd						[122]
FeMo						[123]
Fe ₃ Pt						[124]
FeMn						[129]
FeV						[129]

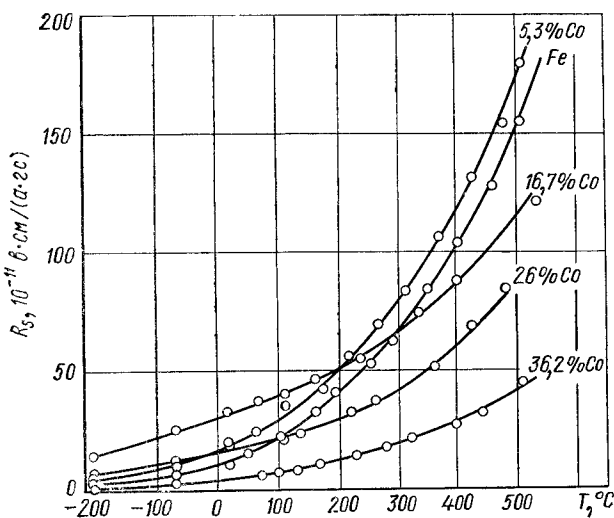


Рис. 26.13. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла от температуры для железо-кобальтовых сплавов [101].

Таблица 26.16
Коэффициенты Холла для сплавов кобальта с никелем [115]

Массовое содержание Ni, %	$T, ^\circ\text{K}$	$B, \text{ вб/м}^2$	$R_0, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{К}$	$R_1, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{К}$
0	287	0,2—3	—1,33	+0,19
15	286	0,2—3	—1,64	+1,48
30	285	0,2—3	—1,96	+2,16
45	285	0,2—3	—1,95	+2,73
62	282	0,2—3	—1,99	+1,99
78	284	0,2—3	—1,56	—0,16
89	281	0,2—3	—1,13	—8,25
100	282	0,2—3	—0,56	—5,21

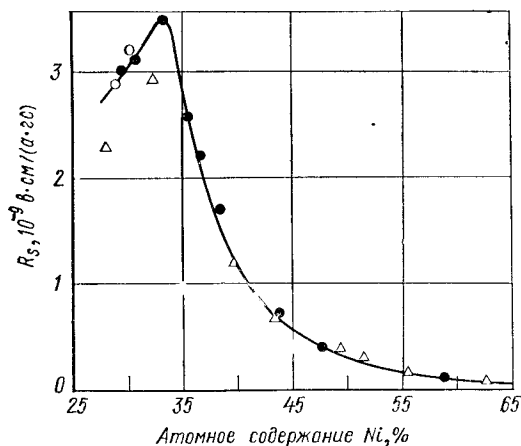


Рис. 26.14. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла сплава Fe — Ni от концентрации Ni [105] (Δ, ●, ○ — данные разных авторов).

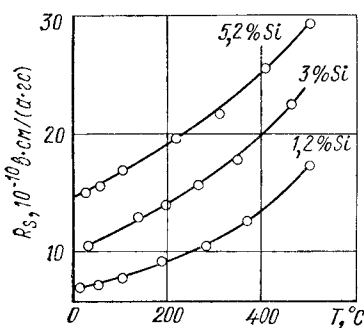


Рис. 26.15. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла от температуры для сплавов Fe — Si различного состава [109].

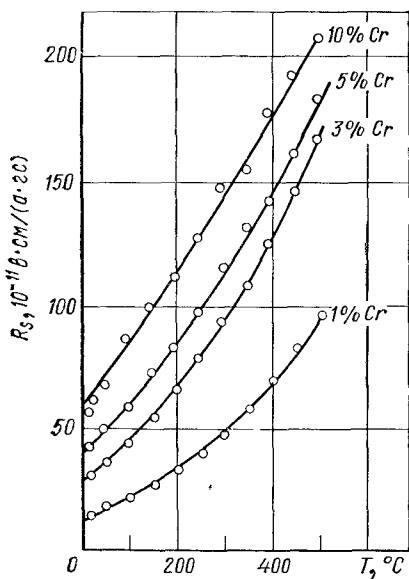


Рис. 26.16. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла от температуры для сплавов Fe—Cr различного состава [112].

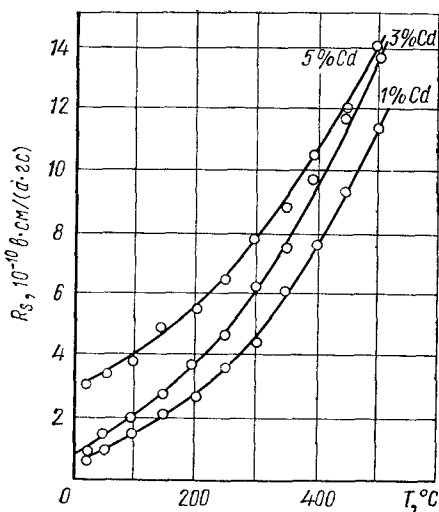


Рис. 26.17. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла от температуры для сплавов Fe—Cd различного состава [112].

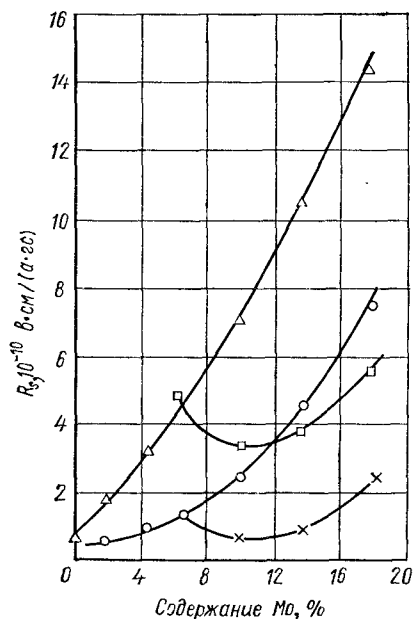


Рис. 26.18. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для сплава Fe—Mo от концентрации Mo [113]: после закалки: Δ — $T = 18^{\circ}\text{C}$; $\circ$ — $T = -195^{\circ}\text{C}$; после отжига: $\square$ — $T = 18^{\circ}\text{C}$; $\times$ — $T = -195^{\circ}\text{C}$.

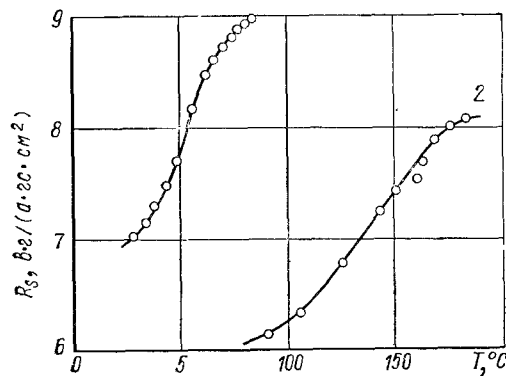


Рис. 26.19. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для сплава Fe₃Pt от температуры [114]: 1 — для закаленного состояния; 2 — для отожженного состояния.

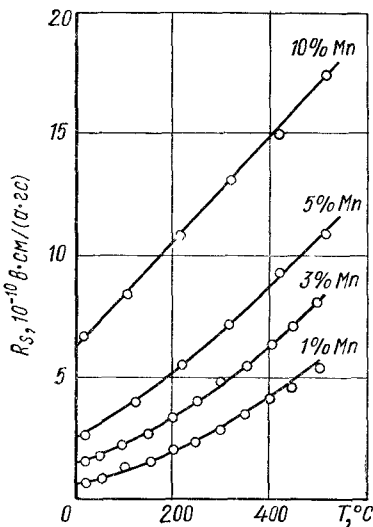


Рис. 26.20. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для сплавов Fe—Mn различного состава от температуры [109].

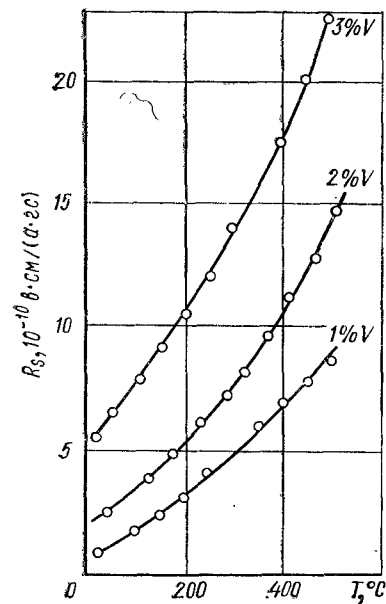


Рис. 26.21. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для сплавов Fe—V различного состава от температуры [102].

Гальваномагнитные коэффициенты для сплавов с никелем
Значения термомагнитных коэффициентов см. в сносках

Сплав	$T, ^\circ K$	$\rho, 10^{-8} \text{ ом} \cdot \text{м}$	$B, \text{ вб/м}^2$	$R_0, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{К}$	$R_1, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{К}$	Литература
Ni—Al						
Атомное содержание Al, %						
8	20	12,4	—	—1,8	—38	[96]
8	77	13,1	1,4	—1,8	—44	[96]
8	290	24,8	—	—1,0	86	[96]
Ni—V						
Атомное содержание V, %						
7	20	33,3	—	—1,6	—239	[96]
7	77	34,1	1,4	—1,95	—257	[96]
7	290	43,9	—	—4,8	—226	[96]
Ni—Cr нихром						
	290	—	—	+5	+199	[94]
	393*	—	0,1—1,1	+4	+220	[94]
Массовое содержание, %						
9,6 Cr+0,2 Mn+0,3 Si	293	67,0	+1,7	—	—1,632*	[116]
20,7% Cr+0,6% Mn+0,3% Si	293	104	1,7		—0,402	[116]
29,2% Cr+0,9% Mn+0,6% Si	293	108, 5	1,7		—0,082	[116]
Ni—Mo						
Атомное содержание Mo, %						
3	20	20,9	1,4	—1,15	—84	[96]
3	77	21,9	1,4	—1,05	—85	[96]
3	290	30,7	1,4	—1,5	—108	[96]
Ni—Mo						[143]
См. рис. 26.22						
Ni—W						
Атомное содержание W, %						
1,6	20	11,0	1,4	—0,7	—21	[96]
1,6	77	11,9	1,4	—1,05	—22	[96]
1,6	290	19,6	1,4	—1,1	—40,7	[96]
Ni—Mn						
Атомное содержание Mn, %						
2,5	309	71,9	3	+0,64	+34	[117]
Ni—Pd						
Атомное содержание Pd, %						
93	293	—	—	—	—5,66	[118]
93	369	—	—	—	—2,48	[118]
93	466	—	—	—	—2,21	[118]
98,5	291	—	—	—	—2,43	[118]
98,5	370	—	—	—	—2,00	[118]
98,5	464	—	—	—	—1,65	[118]
Ni—Cu ^{3*}						
Массовое содержание Cu, %						
04*	293	—	0,1—2,2	—0,65	—7,65	[102]
56*	293	—	0,1—2,2	—1,05	—29,8	[102]

* $Q_1 = 88 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град} \cdot \text{сек})$ при $T = 478^\circ \text{ K}$ [94].** В работе [116] из измерений гальваномагнитных эффектов определен коэффициент $R = Ed/IH$.** Значения R и Q для Ni—Cu см. в работах [118, 121].Значения $Q_1, 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град} \cdot \text{сек})$ [102]: * 34,8; ** 118.

Сплав	$T, ^\circ\text{K}$	$\rho, 10^{-8} \text{ ом}\cdot\text{м}$	$B, \text{ вб/м}^2$	$R_0, 10^{-10} \text{ м}^3/\text{К}$	$R_1, 10^{-10} \text{ м}^3/\text{К}$	Литература
10 *	293	—	0,1—2,2	—1,1	—52,0	[102]
15 ^{2*}	293	—	0,1—2,2	—1,1	—59,1	[102]
25 ^{3*}	293	—	0,1—2,2	—1,7	—83,7	[102]
30 ^{1*}	293	—	0,1—2,2	—1,8	—41,9	[102]
35	293	—	0,1—2,2	—2,6	—6,31	[102]
Атомное содержание Cu, %						
9	20	8,3	1,4	—2,4	—9,6	[96]
9	77	9,3	1,4	—2,1	—10,3	[96]
9	290	18,5	1,4	—1,15	—28,9	[96]
18	20	15,5	1,4	—2,5	—20	[96]
18	77	16,7	1,4	—2,3	—22,3	[96]
18	290	28,8	1,4	—1,35	—45,4	[96]
40	64	34,12	$\leq 1,55$	—2,03	—34,86	[119]
40	77	35,34	$\leq 1,55$	—1,87	—36,00	[119]
40	112	37,76	$\leq 1,55$	—1,75	—39,19	[119]
40	169	42,00	$\leq 1,55$	—1,80	—44,89	[119]
40	231	45,33	$\leq 1,55$	—2,22	—	[119]
40	250	—	$\leq 1,55$	—2,16	—	[119]
40	281	—	$\leq 1,55$	—1,67	—	[119]
40	310	47,29	$\leq 1,55$	—1,50	—	[119]
40	342	—	$\leq 1,55$	—1,55	—	[119]
30	64	24,89	$\leq 1,55$	—1,96	—32,0	[119] ^{5*}
30	77	25,31	$\leq 1,55$	—1,86	—34,4	[119]
30	122	27,55	$\leq 1,55$	—1,69	—38,6	[119]
30	169	31,40	$\leq 1,55$	—1,48	—47,1	[119]
30	230	36,22	$\leq 1,55$	—1,47	—57,3	[119]
30	269	29,55	$\leq 1,55$	—1,40	—69,4	[119]
30	295	41,89	$\leq 1,55$	—1,65	—81,6	[119]
30	304	42,55	$\leq 1,55$	—1,93	—92,7	[119]
30	316	43,71	$\leq 1,55$	—2,32	—203,0	[119]
30	341	44,90	$\leq 1,55$	—2,66	—	[119]
30	399	46,48	$\leq 1,55$	—1,83	—	[119]
20	77	16,22	$\leq 1,55$	—2,06	—18,5	[119]
20	112	17,55	$\leq 1,55$	—1,97	—20,6	[119]
20	169	20,26	$\leq 1,55$	—1,85	—25,4	[119]
20	231	23,83	$\leq 1,55$	—1,67	—31,5	[119]
20	298	—	$\leq 1,55$	—1,37	—47,4	[119]
20	302	29,27	$\leq 1,55$	—	—	[119]
Атомное содержание Ni, %						
100	$T > T_c$	—	—	—0,6	—4,1	[120]
90,62		—	—	—1,2	—38,9	[120]
81,23		—	—	—1,4	—47,0	[120]
71,68		—	—	—1,7	—32,5	[120]
61,87		—	—	—1,6	—25,0	[120]
CuNi+добавки						
Массовое содержание Ni, %	Монель	298	—	0,04—1,1	—1,1	[94]
	29,5% Cu	329 ^{3*}	—	0,04—1,1	—	[94]
	1,5% Fe	339	—	0,04—1,1	—2,7	[94]
	1% Mn	366 ^{6*}	—	0,04—1,1	—	[94]

Значения $Q_1, 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град}\cdot\text{сек})$ [102]: * 207; ^{2*} 256; ^{3*} 350; ^{4*} 174.Значения $Q_0, Q_1, 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град}\cdot\text{сек})$ [94]: ^{5*} $Q_0 = 8$, $Q_1 = 3/0$; ^{6*} $Q_0 = 12$; $Q_1 = 221$.

Сплав		$T, ^\circ\text{K}$	$\rho, 10^{-8} \text{ ом}\cdot\text{м}$	$B, \text{ вб/м}^2$	$R_0, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{K}$	$R_1, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{K}$	Литература
		369 400* 410 440 ^{2*}	— — — —	0,04—1,1 0,04—1,1 0,53 0,106	—2,5 — — —	—10 — —2,38 ^{3*} —	[94] [94] [94] [94]
40	константан	293	—	1,1	—	—0,90 ^{3*}	[60]
37,77	константан 59,62% Cu 1,39% Mn 0,65% Fe	80 293	— —	0,4—1,6 0,4—1,6	— —	—0,91 ^{3*} —1,16 ^{3*}	[122] [122]
20	нейзильбер 50% Cu 30% Zn	293		—	—	—0,53 ^{3*}	[123]
9,21	нейзильбер 87,35% Cu 2,89% Al 0,50% Fe	80 293	— —	0,4—1,6 0,4—1,6	— —	—0,12 ^{3*} —0,32 ^{3*}	[122] [122]
4	манганин	423 633 1083	— — —	0,41 0,494 0,492	— — —	—0,569 ^{3*} —0,455 ^{3*} —0,460 ^{3*}	[124] [124] [124]
4,88	манганин 80,88% Cu 12,72% Mn 1,27% Fe	80 293	— —	—1,6 —1,6	— —	—0,32 ^{3*} —0,52 ^{3*}	[122] [124]
4,11	манганин 85,40% Cu 10,03% Mn 0,42% Fe	80 293	— —	1,6 1,6	— —	—0,33 ^{3*} —0,55 ^{3*}	[122] [122]
Cu—Ni		См. рис. 26.23, 26.25					[125, 126]
Ni—Co		См. рис. 26.24, 26.28					[125, 128]
Ni с малыми добавками		См. рис. 26.27					[127]
Ni—Si Атомное содержание Si, %							
3		20	9,5	1,4	—0,7	—19	[96]
3		77	10,1	1,4	—1,0	—20	[96]
3		290	18,0	1,4	—1,1	—40	[96]

Значения $Q_0, Q_1, 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град}\cdot\text{сек})$ [94]: * $Q_0=20, Q_1=65$; ** $Q=9,7$.** В работах [121]—[124] из измерений гальвано- и термомагнитных эффектов определены коэффициенты $R=Ed/IH$ и $Q=Ed/\Delta TH$.

Сплав	$T, ^\circ K$	$\rho, 10^{-8} \text{ ом} \cdot \text{м}$	$B, \text{ вб/м}^2$	$R_0, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{К}$	$R_1, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{К}$	Литература
Ni—Sn Атомное содержание Sn, %						
3	20	10,8	1,4	—0,85	—19	[96]
3	77	11,4	1,4	—0,9	—19	[96]
3	290	17,2	1,4	—2,0	—36	[96]
Ni—Cu—Fe Атомное содержание, % 97Ni+2Cu+1Fe	300	10,6	4,79	—0,753	—12,0	[129]
	27	3,62	5,18	—0,853	—1,67	[129]
	20	2,96	5,21	—0,978	—1,19	[129]
93Ni+4,5 Cu+2,5Fe	300	15,3	4,84	—1,05	—15,0	[129]
	77	6,99	5,23	—1,40	—38,9	[129]
	20	5,79	5,26	—1,53	—2,78	[129]
86Ni+9,3Cu+4,7Fe	300	23,4	4,49	—1,42	—20,5	[129]
	77	13,6	5,00	—2,19	—6,36	[129]
	20	12,8	5,06	—2,28	—5,49	[129]
70Ni+20Cu+10Fe	300	32,8	4,77	—1,82	+5,06	[129]
	77	18,0	5,15	—2,53	+3,02	[129]
	30	16,7	5,19	—2,72	+2,94	[129]
Ni ₃ (MnFe) Ni ₃ Mn 75,2Ni+20Mn+4,8Fe	300	—	—	+0,09	0	[130]
	300	—	—	—0,41	12,69	[130]
75Ni+16Mn+9Fe	300	—	—	—1,21	25,58	[130]
73,3Ni+12,4Mn+13,3Fe	300	—	—	—1,65	27,15	[130]
74,6Ni+9,4Mn+16Fe	300	—	—	—1,88	22,53	[130]
74,5Ni+6,3Mn+19,2Fe	300	—	—	—2,03	14,52	[130]
Ni ₃ Fe 75Ni+21Mn+4Co	300	—	—	—2,13	4,43	[130]
	300	—	—	—1,76	27,8	[130]
75,4Ni+16Mn+8,6Co	300	—	—	—1,36	7,69	[130]
70Ni+17,5Mn+12,5Co	300	—	—	—1,99	13,93	[130]
37,5Ni+5,7Cr+56,8Fe (инварный сплав)	4,2	—	—	—	24	[131]

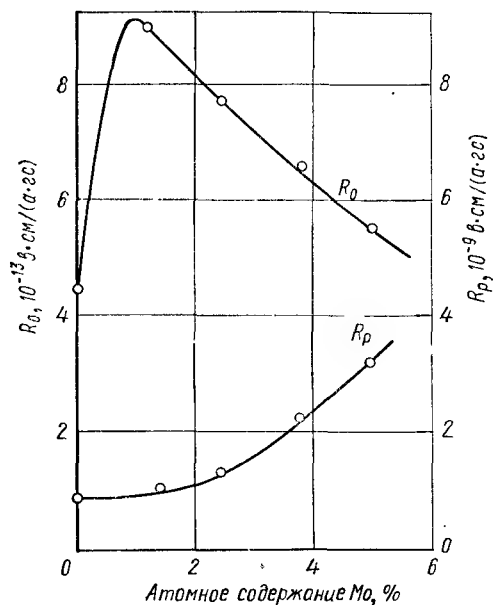


Рис. 26.22. Зависимость коэффициентов Холла R_0 и R_p от содержания Мо в сплавах с Ni в парамагнитной области температур [143].

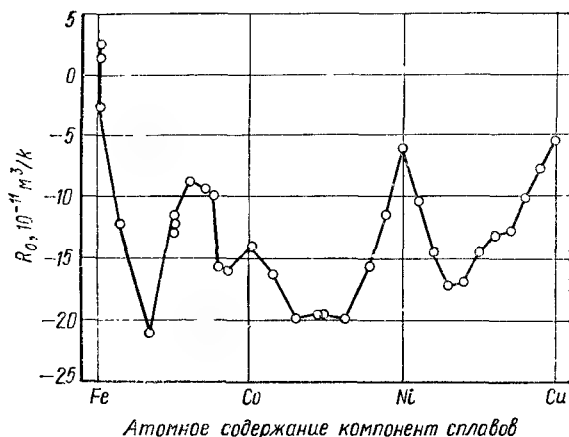


Рис. 26.23. Обыкновенные коэффициенты Холла для сплавов Fe — Co, Co — Ni, Ni — Cu при температуре 20° С [125].

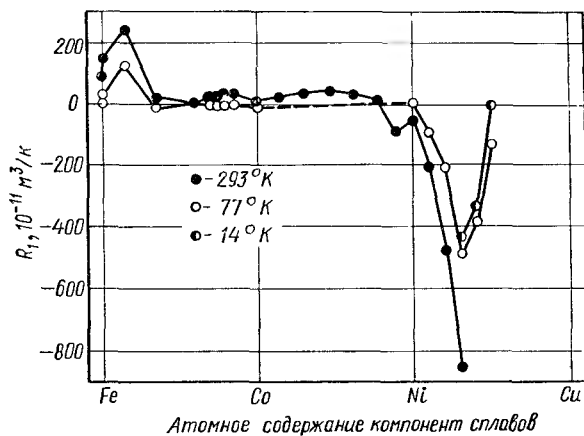


Рис. 26.24. Аномальные коэффициенты Холла для сплавов Fe — Co, Co — Ni, Ni — Cu при температуре 20° С [125].

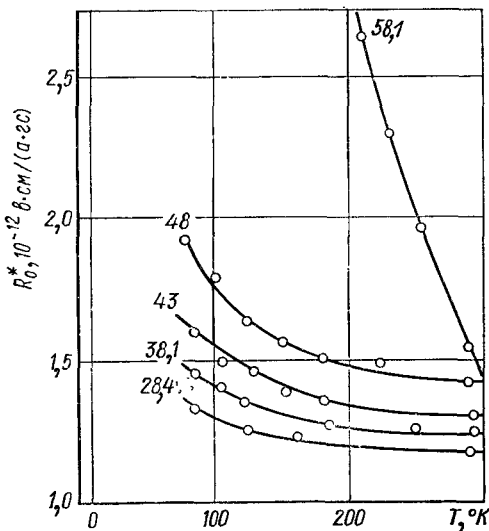


Рис. 26.25. Зависимость обыкновенного коэффициента Холла для сплавов Cu — Ni с большим содержанием никеля от температуры [126]. Числа у кривых означают атомное содержание Ni, %.

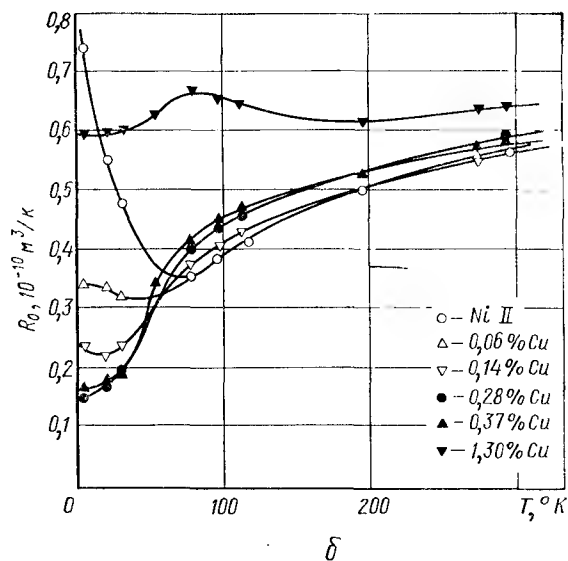
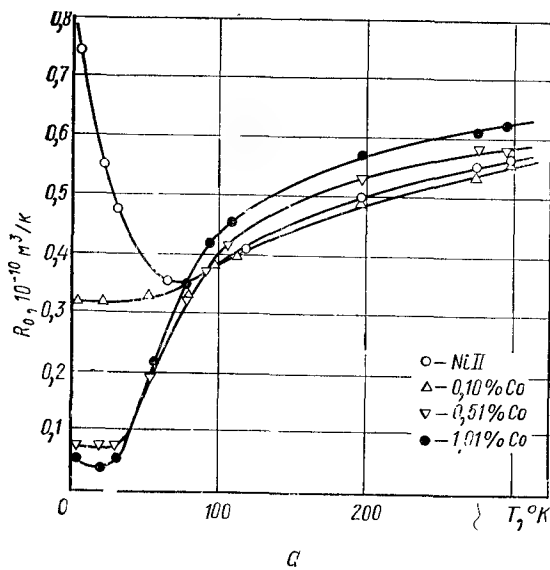


Рис. 26.26. Зависимость от температуры обыкновенного коэффициента Холла для сплавов Ni с малыми добавками Co (a) и с малыми добавками Cu (б) [127].

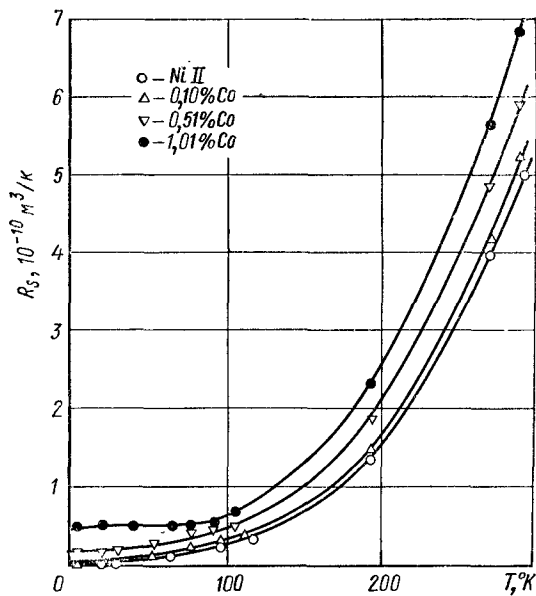
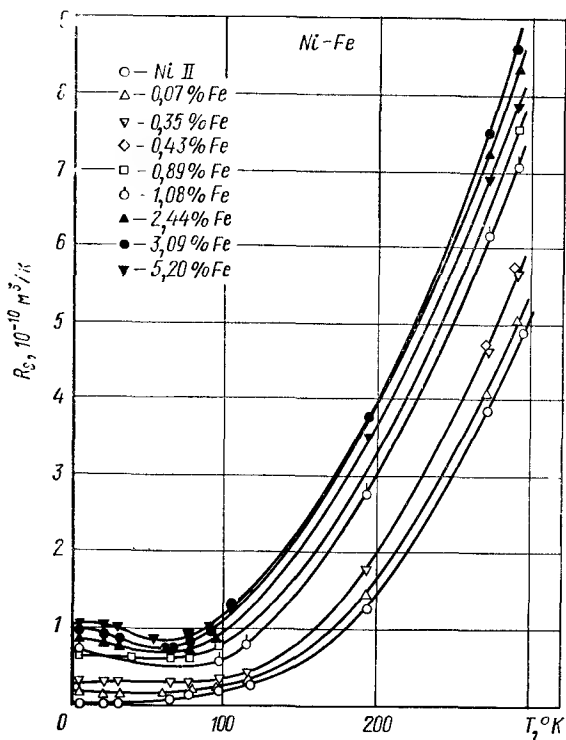


Рис. 26.27. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для сплавов Ni с малыми добавками Fe от температуры [127].

Рис. 26.28. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для сплавов Ni с малыми добавками Co от температуры [127].

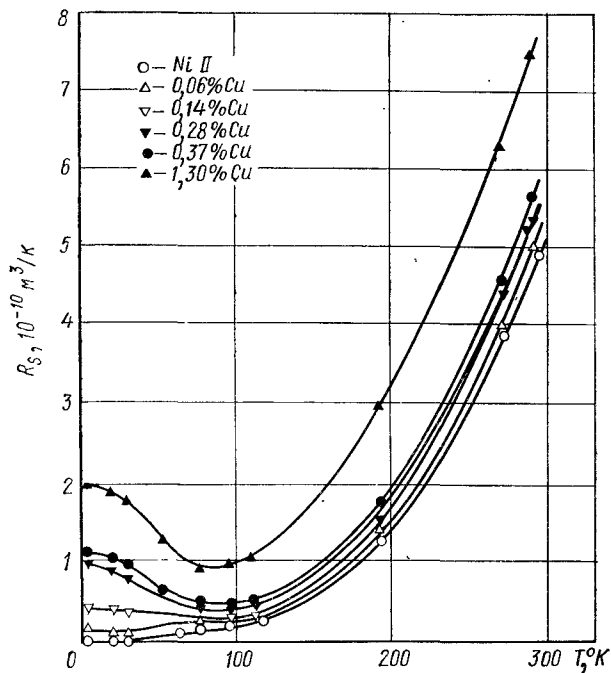


Рис. 26.29. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для сплавов Ni с малыми добавками Cu [127].

Таблица 26.18

Гальваномагнитные коэффициенты редкоземельных ферромагнетиков и их сплавов
Значения термомангнитных элементов см. в сносках

Металл	$T, ^\circ\text{K}$	$\rho, 10^{-8} \text{ ом}\cdot\text{м}$	$R_0, 10^{-10} \text{ м}^3/\text{К}$	$R_1, 10^{-10} \text{ м}^3/\text{К}$	Литература
Gd* $\left(\frac{\rho_{293^\circ\text{K}}}{\rho_{4,2^\circ\text{K}}} = 50\right)$ $B=0\div 3,2 \text{ вб/м}^2$	227	117	—	—2900	[132]
	194,5	97	—	—2400	[132]
	182	90	—	—2100	[132]
	168	83	—	—1800	[132]
	146	71	—	—1330	[132]
	119,5	56	—	—885	[132]
	105,3	48	—	—692	[132]
	86	38	—	—410	[132]
	77	32	—	—282	[132]
	56,5	19,5	—	—128	[132]
	40,5	10	—	—51	[132]
	32	6	—	—10,3	[132]
	20	2,5	—	—3,9	[132]
	>290	—	—3,0	—2700	[132]
$\left(\frac{\rho_{293^\circ\text{K}}}{\rho_{4,2^\circ\text{K}}} = 51\right)$	>290	—	—2,0	—3840	[133]
Монокристалл	>290	—	—	$R_b = -4570$ $R_c = -2570^{2*}$	[134]

* $P = 11,6 \cdot 10^{-4} \text{ град}\cdot\text{м}^3/(\text{в}\cdot\text{К})$ (поликрист. Gd), $P = 70 \cdot 10^{-4} \text{ град}\cdot\text{м}^3/(\text{в}\cdot\text{К})$ (монокрист. Gd) [12].

** R_b — вдоль оси b , R_c — вдоль оси c .

Металл	$T, ^\circ\text{K}$	$\rho, 10^{-8} \text{ ом}\cdot\text{м}$	$R_0, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{K}$	$R_1, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{K}$	Литература
Пленка	300	—	—8,0	—1700	[135]
Монокристалл $\left(\frac{\rho_{293^\circ\text{K}}}{\rho_{4,2^\circ\text{K}}} = 46 \right)$	См. рис. 26.30, 26.31				[136]
Tb* $\left(\frac{\rho_{293^\circ\text{K}}}{\rho_{4,2^\circ\text{K}}} = 38 \right)$ $B = 0 \div 3,2 \text{ вб/м}^2$	195 180 170 160 146 130 115 108 100 90 80 60 50 39 29,5 20 > 230	87 79 74 69 62 54 46 43 39 35 30 20 15 11 8 5 —	— — — — — — — — — — — — — — — — — —4,48	+17,9 +41,7 +37,3 +61,1 +64,8 +62,5 +46,5 +39,1 +30,7 +25,6 +15,3 +4,47 —1,20 —6,33 —7,84 —10,5 —47,50	[132] [132] [132] [132] [132] [132] [132] [132] [132] [132] [132] [132] [132] [132] [132] [132] [132] [132]
Монокристалл ^{2*} H < 1010 >	> 230 140 205 < 90 30 > 230	— — — — — —	—1,0 — +8,8 —1,0 — —3,6	—40,5 +22,4 — — 0 —77,0	[138] ^{5*} [138] [138] [138] [138] [138]
H оси c (см. рис. 26.32)					
$\frac{\rho_{293^\circ\text{K}}}{\rho_{4,2^\circ\text{K}}} = 20^{**}$	> 230	—	—4,2	—52	[139] ^{5*}
Монокристалл H < 0001 > H < 1210 >	> 230 150	— —	—1,1 +3	—40 +12	[139] [139]
Dy ^{4*} Монокристалл $\frac{\rho_{293^\circ\text{K}}}{\rho_{4,2^\circ\text{K}}} = 10$ H < 1010 >	> 178 > 178	— —	—1,1 —5,7	—32,6 —25,5	[140] ^{5*} [140]

* $P = 29,3 \cdot 10^{-4} \text{ град}\cdot\text{м}^2/(\text{в}\cdot\text{K})$ (поликрист. Tb) [12].^{2*} $B = 0 \div 3,2 \text{ вб/м}^2$.^{3*} $B = 0 \div 3,4 \text{ вб/м}^2$.^{4*} $P = 30,4 \cdot 10^{-4} \text{ град}\cdot\text{м}^2/(\text{в}\cdot\text{K})$ (поликрист. Dy) [12].^{5*} В работах [138—140] R_s определялось из выражения: $e = R_0 H + R_s^4 \pi M$ [сравн. с (26.2), с. 468].

Металл	$T, ^\circ\text{K}$	$\rho, 10^{-8} \text{ ом}\cdot\text{м}$	$R_0, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{K}$	$R_1, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{K}$	Литература
Монокристалл $\frac{\rho_{293^\circ\text{K}}}{\rho_{4,2^\circ\text{K}}} = 16$ $\text{H} \parallel \langle 1120 \rangle$ $\text{H} \parallel \langle 0001 \rangle$ (см. рис. 26.33)	≥ 178 ≥ 225	— —	—0,3 —3,7	—18 —23	[141]* [141]
Поликристалл $\frac{\rho_{293^\circ\text{K}}}{\rho_{4,2^\circ\text{K}}} = 12$	≥ 160	—	—2,2	—2,8	[142]*
Gd—Y Атомное содержание Gd, %					
100	240	79	—	—2400	[144]
100	200	66	—	—1670	[144]
100	150	48	—	—950	[144]
100	100	31	—	—410	[144]
100	50	11	—	—75	[144]
100	20	3	—	—8	[144]
100	≥ 350	—	—	—2270	[144]
84	240	98	—	—2780	[144]
84	200	85	—	—1960	[144]
84	150	66	—	—1170	[144]
84	100	47	—	—650	[144]
84	50	37	—	—240	[144]
84	20	19	—	—65	[144]
84	≥ 350	—	—	—219	[144]
72	200	99	—	—2160	[144]
72	150	81	—	—1220	[144]
72	100	61	—	—570	[144]
72	50	38	—	—182	[144]
72	20	28	—	—50	[144]
72	≥ 300	—	—	—2130	[144]
55	150	88	—	—2140	[144]
55	100	71	—	—1300	[144]
55	50	51	—	—570	[144]
55	20	43	—	—300	[144]
55	≥ 250	—	—	—1900	[144]
46	≥ 200	—	—	—1700	[144]

* См. сноску ** на с. 493.

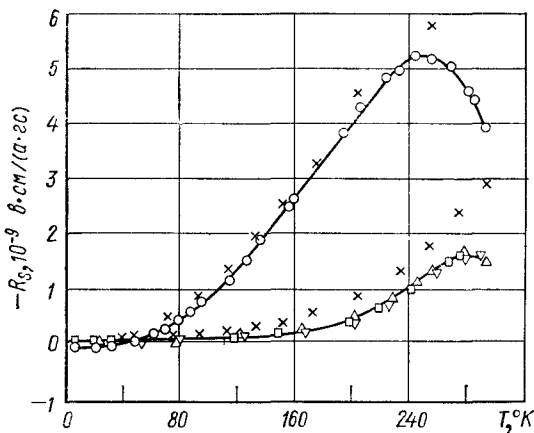


Рис. 26.30. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для монокристаллов гадолиния от температуры [136]:
 ∇ — $H \parallel a$; $\square$ — $H \parallel b$; $\circ$ — $H \parallel c$; ∇ — $H \parallel a$; $\times$ — данные [134].

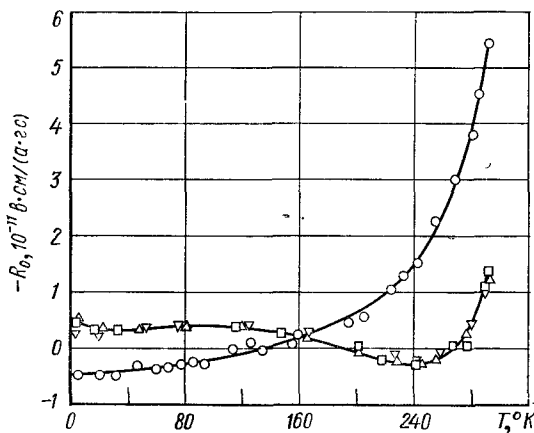


Рис. 26.31. Зависимость обыкновенного коэффициента Холла для монокристаллов гадолиния от температуры [136]:
 ∇ — $H \parallel a$; $\square$ — $H \parallel b$; $\circ$ — $H \parallel c$; ∇ — $H \parallel a$.

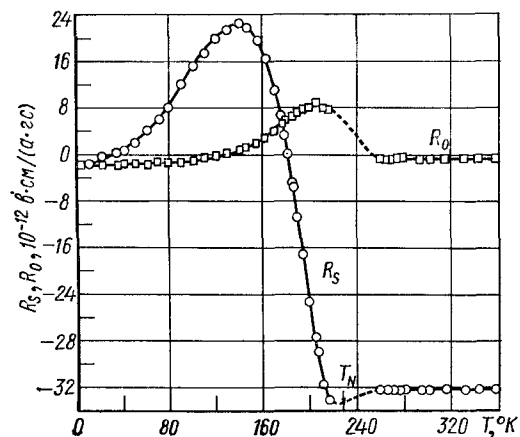


Рис. 26.32. Зависимость обыкновенного и ферромагнитного коэффициентов Холла монокристаллических образцов тербия от температуры $H \parallel \langle 1010 \rangle$ [138].

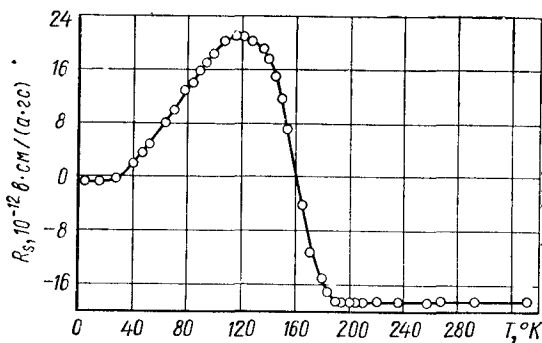


Рис. 26.33. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла монокристалла диспрозия от температуры $H \parallel \langle 1120 \rangle$ [141].

Таблица 26.19

Гальваномагнитные коэффициенты ферромагнитных сплавов из неферромагнитных компонентов

Сплав	$T, ^\circ K$	$\rho, 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$	$R_0, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{К}$	$R_1, 10^{-10} \text{ м}^2/\text{К}$	Литература
14,6% Al + + 26,5% Mn + + 58,9 % Cu (сплав Гейслера)*	83	—	—	+ 8,8	[145]
	291	—	—	+ 24,4	[145]
	331	—	—	+ 29,0	[145]
MnSb ^{2*}	177	35	—	530	[146]
	235	55	—	940	[146]
	293	72	+8	1 200	[146]
	353	90	—	1 560	[146]
	412	112	—	2 410	[146]
	470	132	—	3 560	[146]
	530	170	—	6 660	[146]
	590	—	—	10 500	[146]
MnAu ₂	295	—	2,19	—242	[149]
	295	—	—	—100	[150]
	450	—	—1,2	—	[150]
Mn ₅ Ge ₂ (ферромагнетик) ^{3*}	328	—	—	—11 800	[151]
CrTe	93	—	—	— 7 000	[147]
	152	—	—	— 8 500	[147]
	273	—	—	—31 500	[147]
Cr—V ат. % V					
	5	293	—	2,1	[148]
		77	—	5,2	[148]
	10	293	—	2,7	[148]
		77	—	3,5	[148]

* $B = 0,44 \text{ вб/м}^2$; $Q_1 = 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{град} \cdot \text{сек})$; $Q_1 = 12,0 (253^\circ K)$, $Q_1 = 10,4 (298^\circ K)$, $Q_1 = 7,1 (355^\circ K)$ [64].

** $B = 0-2,0 \text{ вб/м}^2$.

*** $B = 0-1,6 \text{ вб/м}^2$.

26.5. ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В таблицах этого раздела приняты обозначения:
 R_{HT} — сопротивление при напряженности поля H и температуре T ;
 R_{0T} — сопротивление при $H = 0$ и при температуре T ;

$$r_{273,2} = R_{0T} / R_{0273,2};$$

$$r_{290} = R_{0T} / R_{0290};$$

$$\Delta R = R_{HT} - R_{0T}.$$

Для ферромагнетиков вместо R_{0T} берется R_{BT} , где B — магнитная индукция внутри металла.

Для монокристаллов:

а) для кубического кристалла:

Φ — угол между главной осью и направлением тока;

Ψ — угол между главной осью и направлением магнитного поля;

б) для тетрагональных, гексагональных и ромбоэдрических систем: Φ — угол между осью c и направлением тока;

φ — угол между осью a и направлением тока;

Ψ — угол между осью c и направлением магнитного поля;

Ψ — угол между осью a и направлением магнитного поля.

Таблица 26.20

Изменение сопротивления чистых металлов в магнитном поле (магнитное поле перпендикулярно к направлению электрического тока через образец, так называемый поперечный четный гальваномагнитный эффект)

Металл	Состояние	$T, ^\circ K$	а) $r_{273,2}$ б) r_{290}	Угол, град	$H, кэ$	$\Delta R/R_{0T}$	Литература
Li	Поликристалл (0,1% примесей)	78	б) 0,137	—	100 200 300	0,024 0,082 0,152	[152] [152] [152]
	Поликристалл	20,4	а) 0,0243	—	30,4	0,11	[153]
Be	»	291	б) 1	—	300	0,66	[152]
		78	б) 0,33	—	300	2,28	[152]
	Монокристалл	90,3	а) 0,02775	$\Phi = 90$ $\varphi = 2$ $\Psi = 0$	3,4 10,1 11,7	0,428 2,180 2,720	[154] [154] [154]
		90,3	а) 0,02775	$\Phi = 90$ $\varphi = 2$ $\Psi = 30$	3,4 10,1 11,7	0,461 2,67 3,422	[154] [154] [154]
		90,3	а) 0,02775	$\Phi = 90$ $\varphi = 2$ $\Psi = 90$	3,4 10,1 11,7	0,2835 1,516 1,935	[154] [154] [154]
		90,3	а) 0,02775	$\Phi = 90$ $\varphi = 2$ $\Psi = 90$	3,4 10,1 11,7	0,2835 1,516 1,935	[154] [154] [154]
Na	Поликристалл	80	б) 0,2	—	300	0,07	[152]
		20,4	а) 0,00675	—	9,36 35,1	0,0745 0,503	[153] [153]
Mg	»	291	б) 1	—	100 200 300	0,022 0,082 0,167	[152] [152] [152]
		195	б) 0,68	—	100 200 300	0,048 0,173 0,317	[152] [152] [152]
		78	б) 0,17	—	100 200 300	0,54 1,65 2,82	[152] [152] [152]
	»	291	б) 1	—	100 200 300	0,022 0,082 0,167	[152] [152] [152]
		195	б) 0,68	—	100 200 300	0,048 0,173 0,317	[152] [152] [152]
		78	б) 0,17	—	100 200 300	0,54 1,65 2,82	[152] [152] [152]

Металл	Состояние	$T, ^\circ K$	а) $r_{273,2}$ б) r_{290}	Угол, град	$H, кэ$	$\Delta R/R_0 T$	Литера- тура
Al	Поликристалл	77,2	а) 0,161	—	5,2 23,5	0,0008 0,0110	[156] [156]
		20,4	а) 0,067	—	4,1 23,5	0,0033 0,0640	[156] [156]
		14,2	а) 0,066	—	5,2 23,5	0,0056 0,0678	[156] [156]
K	»	20,4	а) 0,0247	—	15,45 35,1	0,0184 0,0502	[153] [153]
Ti	Монокристалл	20,4 14,2	а) 0,1423 а) 0,1394	—	23,6 23,6	0,002 0,002	[156] [156]
V	Поликристалл	291 80	б) 1 б) 0,225	— —	300 300	$< 0,01$ $\sim 0,04$	[152] [152]
Cr	»	291 78	б) 1 б) 0,083	— —	300 300	0,3 4,36	[152] [152]
Fe	»	80	—	—	300	0,053	[152]
	Поликристалл электро- литический (0,001% примесей)	290	—	—	30	—9,78	[160]
Co	Поликристалл (1,6% примесей)	290	—	—	6,0 10,0 18,0	—0,0004 —0,0011 —0,0016	[161] [161] [161]
Ni	Поликристалл	573	—	—	2 5 10	$3 \cdot 10^{-4}$ $-8 \cdot 10^{-4}$ $-21 \cdot 10^{-4}$	[161] [161] [161]
		291 80	— —	— —	300 300	—0,046 —0,029	[152] [152]
Cu	»	78	б) 0,141	—	100 200 300	0,093 0,274 0,469	[152] [152] [152]
		78 20,4	б) 0,148 б) 0,020	— —	23,6 23,6	0,009 0,192	[156] [156]
	Монокристалл	20,4	а) 0,00092	$\Phi = 22$ $\Phi = 69$ $\Psi = 0$	2,28 4,49 10,88	0,548 0,957 1,893	[158] [158] [158]
Zn	Поликристалл (0,0004% примесей)	291 78	б) 1 б) 0,19	—	300 300	0,06 0,927	[152] [152]
	Поликристалл	77,2	а) 0,202	—	23,6	0,018	[156]

Металл	Состояние	T , °K	а) $r_{273,2}$ б) r_{290}	Угол, град	H , кэ	$\Delta R/R_{0T}$	Литература
Ga	Поликристалл (0,27% примесей)	195	б) 0,65	—	100	0,033	[152]
					200	0,115	[152]
					300	0,173	[152]
	Монокристалл	77,4	—	$\Phi = 0$ $\psi = 0$	1,200 8,400 23,500	0,00018 0,00349 0,01394	[165] [165] [165]
		77,4	—	$\Phi = 0$ $\psi = 90$	1,200 8,400 23,500	0,00006 0,00284 0,01279	[165] [165] [165]
Rb	Поликристалл	14	а) 0,0339	—	40	$< 0,004$	[153]
Zr	Поликристалл	195	б) 0,63	—	300	$< 0,01$	[152]
		80	б) 0,23	—	300	0,05	[152]
Nb	» 0,08% O ₂ 0,02% Ta	20,4	а) 0,0682	—	40	0,001	[157]
Mo	Поликристалл	195	б) 0,61	—	300	0,095	[152]
		78	б) 0,136	—	300	0,915	[152]
Ru	Поликристалл (0,01% примесей)	20,4	б) 0,0683	—	40	0,151	[162]
Rh	Поликристалл	20,4	б) 0,0036	—	36,3	1,546	[163]
		4,22	б) 0,0029	—	37,6	1,867	[163]
Pd	Поликристалл (0,01% примесей)	78	б) 0,17	—	300	0,102	[152]
Ag	Поликристалл	78	б) 0,181	—	300	0,376	[152]
		20,4	а) 0,00293	—	10,85	1,334	[158]
Cd	Поликристалл	291	б) 1	—	300	0,08	[152]
		195	б) 0,68	—	300	0,19	[152]
		78	б) 0,22	—	300	0,927	[152]
	Монокристалл	78	а) 0,2466	$\Phi = 84$ $\Psi = 90$	4,8 17,3 34,7	0,005 0,044 0,117	[156] [156] [156]
		20,4	а) 0,0218	$\Phi = 0$	10,0	0,184	[156]
					26,5 35,1	0,672 1,07	[156] [156]
In	Поликристалл	165	б) 0,63	—	300	0,03	[152]
		80	б) 0,22	—	300	0,14	[152]
		78	а) 0,2171	—	40	0,0084	[166]
Sn	Поликристалл (0,01% примесей)	291	б) 1	—	300	0,02	[152]
		80	б) 0,22	—	300	0,23	[152]
	Поликристалл	14,2	—	—	23,5	0,0046	[167]

Металл	Состояние	$T, ^\circ\text{K}$	а) $r_{273,2}$ б) r_{290}	Угол, <i>град</i>	$H, \text{кэ}$	$\Delta R/R_0T$	Литература
Sb	Поликристалл	291 80	б) 1 б) 0,30	— —	300 300	3,5 40,0	[152] [152]
		77,8	а) 0,1763	$\Phi = 1,5$ $\Psi = 90$ $\varphi = 90$	3,43 6,75 10,1	0,105 0,309 0,598	[168] [168] [168]
	Монокристалл	77,8	а) 0,1763	$\Phi = 1,5$ $\Psi = 90$ $\varphi = 0$	3,43 6,75 10,1	0,105 0,295 0,542	[168] [168] [168]
		78,1	а) 0,1826	$\Phi = 85$ $\Psi = 90$ $\varphi = 88$	3,43 6,75 10,1	0,152 0,433 0,812	[168] [168] [168]
Cs	Поликристалл	20,4	а) 0,0746	—	40	0,03	[153]
Ba	»	20,4	а) 0,027	—	8,5 33,2	0,041 0,41	[155] [155]
		14,0	а) 0,015	—	17,6 33,2	0,337 0,962	[155] [155]
		1,85	а) 0,0071	—	29,4 33,9	2,39 3,08	[155] [155]
Ta	Поликристалл (0,1% примесей)	291 80	б) 1 б) 0,3	— —	300 300	0,001 0,01	[152] [152]
		20,4	а) 0,0144	—	6,67 11,1 17,4 25,4 35,0	0,0067 0,0135 0,0297 0,0580 0,0985	[157] [157] [157] [157] [157]
	Поликристалл						
W	»	78	а) 0,195	—	300	0,938	[152]
		20,4	а) 0,00216	$\Phi = 0$ $\Psi = 0$	2,28 12,20	0,861 9,92	[158] [158]
		20,4	а) 0,00216	$\Phi = 0$ $\Psi = 45$	2,28 12,20	0,915 14,22	[158] [158]
Re	Поликристалл (0,42% примесей)	80 20,4	а) 0,166 а) 0,0179	— —	34,3 34,3	0,0196 0,266	[159] [159]
Pt	Поликристалл	78	б) 0,185	—	100 200 300	0,008 0,037 0,102	[152] [152] [152]
		20,4	а) 0,00425	—	2,28 4,49 8,79 12,20	0,012 0,036 0,099 0,157	[158] [158] [158] [158]

Металл	Состояние	$T, ^\circ\text{K}$	а) $r_{273,2}$ б) r_{290}	Угол, град	$H, \text{кэ}$	$\Delta R/R_{0T}$	Литера- тура
Au	Монокристалл (0,001% примесей)	78,5	а) 0,2175	$\Phi = 38$ $\Phi = 63$	2 4	$0,171$ $0,69$	10^{-4} [164]
		20,4	а) 0,00601	—	2 4 10	$4,32$ $11,8$ $39,3$	10^{-4} [164]
	Поликристалл (0,001% примесей)	79	а) 0,219	—	18,5 25,5 40,1	0,0048 0,0096 0,0180	[157] [157] [157]
Tl	Поликристалл	80	б) 0,23	—	300	0,159	[152]
Pb	Поликристалл (0,001% примесей)	291 80	б) 1 б) 0,25	—	300 300	$<0,01$ 0,05	[152] [152]
	Поликристалл	20,4	а) 0,0296	—	39,8	0,0470	[157]
Bi	Поликристалл (0,01% примесей)	291 80	б) 1 б) 0,346	— —	300 300	37 1360	[152] [152]
	Монокристалл	288	—	$\Phi = 0$ $\psi = 90$	100 200 300	12,5 31,5 49,5	[62] [62] [62]
		91	—	$\Phi = 0$ $\psi = 90$	100 200 300	600 1150 1680	[62] [62] [62]
		288	—	$\Phi = 0$ $\psi = 0$	100 200 300	9,5 23,5 36,5	[62] [62] [62]
		91	—	$\Phi = 0$ $\psi = 0$	100 200 300	500 1050 1570	[62] [62] [62]
Th	Поликристалл	195 80	б) 0,66 б) 0,266	— —	300 300	0,03 0,157	[152] [152]

Таблица 26.21

Изменение сопротивления металлов в магнитном поле (магнитное поле параллельно направлению электрического тока через образец — продольный четиный гальваномагнитный эффект)

Металл	Состояние	$T, ^\circ\text{K}$	а) $r_{273,2}$ б) r_{290}	Угол, град	$H, \text{кэ}$	$\Delta R/R_{0T}$	Литера- тура
Be	Монокристалл	80,3	а) 0,0168	$\Phi = 90$ $\varphi = 90$	4,85	0,191	[169]
		79,5	а) 0,0164	$\Phi = 90$ $\varphi = 0$	4,85	0,214	[169]
Na	Поликристалл	78	а) 0,189	—	16,5	0,0006	[153]

Металл	Состояние	$T, ^\circ K$	а) $r_{273,2}$ б) r_{290}	Угол, град	$H, кэ$	$\Delta R/R_{0T}$	Литера- тура
Al	Поликристалл	78	б) 0,121	—	300	0,358	[152]
		77,2	а) 0,158	—	23,5	0,0038	[156]
K	»	14,0	а) 0,0155	—	35	0,0249	[153]
Fe	Поликристалл электро- литический (0,001% примесей)	290	—	—	20	18,0	[171]
Co	Поликристалл (1,6% примесей)	290	—	—	18,0	0,002	[161]
Cu	Поликристалл	78	б) 0,155	—	300	0,23	[152]
		4,2	а) 0,0089	—	30 150	0,337 1,61	[172] [172]
Ga	Поликристалл (0,27% примесей)	78	б) 0,2	—	100	0,300	[152]
					200	0,625	[152]
					300	0,960	[152]
	Монокристалл*	70,2	—	$\Phi = 0$	11,8	0,00183	[176]
					18,1	0,00419	[176]
					22,3	0,00634	[176]
		20,4	—	$\Phi = 0$	4,8	0,00238	[176]
					11,8	0,00664	[176]
					18,1	0,00897	[176]
					22,3	0,01003	[176]
		20,4	—	$\Phi = 0$ $\varphi = 0$	6,0	0,00126	[176]
					18,1 22,3	0,00452 0,00519	[176] [176]
		20,4	—	$\Phi = 90$ $\varphi = 90$	11,8 18,1 22,3	0,00264 0,00483 0,00618	[176] [176] [176]
Mo	Поликристалл	78	б) 0,135	—	300	0,225	[152]
Ag	»	20	а) 0,0096	—	20	0,190	[173]
Cd	»	78	б) 0,22	—	300	0,705	[152]
In	»	20,4	а) 0,023	—	25,74	0,0451	[166]
W	Монокристалл	20,4	а) 0,0055	$\Phi = 0$	9,33	0,12	[170]
Pt	Поликристалл	20,4	а) 0,0066	—	33,4	0,146	[163]
Bi	Монокристалл	289	—	$\Phi = 0$	10,0 20,0	0,07 0,17	[174] [174]
		289	—	$\Phi = 90$ $\varphi = 0$	10,0 20,0	0,31 0,66	[174] [174]
		289	—	$\Phi = 90$ $\varphi = 90$	10,0 20,0	0,15 0,20	[174] [174]

Металл	Состояние	$T, ^\circ\text{K}$	а) $r_{273,2}$ б) r_{290}	Угол, град	$H, \text{кэ}$	$\Delta R/R_{0T}$	Литература
Bi	Монокристалл	293	—	$\Phi = 0$	2,51	0,008	[175]
					5,02	0,029	[175]
					7,54	0,050	[175]
		293	—	$\Phi = 90$ $\varphi = 0$	2,51	0,029	[175]
					5,02	0,092	[175]
					7,54	0,150	[175]
		293	—	$\Phi = 90$ $\varphi = 90$	2,51	0,046	[175]
					5,02	0,150	[175]
					7,54	0,264	[175]

* В графе $\Delta R/R_{0T}$ приведены значения $\Delta R/R_{0273}$.

Таблица 26.22

Изменение сопротивления сплавов в магнитном поле

Сплав	Состояние	$T, ^\circ\text{K}$	$B, \text{кэс}^*$	$\Delta R/R_{0T}$	Литература
Au—Ag	Атомное содержание Ag, %				
		4,23	1,63 $\perp$	0,00028	[180]
		4,23	8,49 $\perp$	0,00268	[180]
		1,63	1,68 $\perp$	—0,00051	[180]
		1,63	8,49 $\perp$	—0,01123	[180]
Cd—Hg	Поликристалл Атомное содержание Hg, %				
		77,2	23,6 $\perp$	0,0132	[156]
		20,4	23,6 $\perp$	0,0549	[156]
		77,2	23,6 $\perp$	0,005	[156]
		30	23,6 $\perp$	0,018	[156]
		20,4	23,6 $\perp$	0,0007	[156]
		20,4	23,6 $\perp$	0,0007	[156]
Cr—Te	Поликристалл	298	5 $\parallel$	$2 \cdot 10^{-3}$	[106]
		298	10 $\parallel$	$7 \cdot 10^{-3}$	[106]
		298	15 $\parallel$	$12 \cdot 10^{-3}$	[106]
Cu ₂ MnAl (сплав Гейслера)	»	—	4 $\parallel$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	[137]
			6 $\parallel$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	[137]
			4 $\perp$	$5,5 \cdot 10^{-2}$	[137]
			6 $\perp$	$7,8 \cdot 10^{-2}$	[137]

Продолжение табл. 26.22

Сплав	Состояние	$T, ^\circ\text{K}$	$B, \text{кэс}^*$	$\Delta R/R_{0T}$	Литература
Cu—Zn	Поликристалл Массовое содержание Zn, %				
		70	23,6 $\perp$	0,027	[156]
		70	20,4 $\perp$	0,040	[156]
		70	14,2 $\perp$	0,040	[156]
		70	23,6 $\perp$	0,040	[156]
Ni ₃ Mn	Поликристалл неупорядоченный	77	4 $\parallel$	$92 \cdot 10^{-4}$	[95]
		77	8 $\parallel$	$55 \cdot 10^{-4}$	[95]
		77	16 $\parallel$	$30 \cdot 10^{-4}$	[95]
		293	8 $\parallel$	$15 \cdot 10^{-4}$	[95]
		293	16 $\parallel$	$3 \cdot 10^{-4}$	[95]
		293	8 $\perp$	$-20 \cdot 10^{-4}$	[95]
	Поликристалл упорядоченный	293	16 $\perp$	$-25 \cdot 10^{-4}$	[95]
		293	4 $\parallel$	$-70 \cdot 10^{-4}$	[95]
		293	8 $\parallel$	$-155 \cdot 10^{-4}$	[95]
		293	16 $\parallel$	$-220 \cdot 10^{-4}$	[95]
		293	4 $\perp$	$-100 \cdot 10^{-4}$	[95]
		293	8 $\perp$	$-150 \cdot 10^{-4}$	[95]
		293	16 $\perp$	$-180 \cdot 10^{-4}$	[95]

* $\perp, \parallel$ — B перпендикулярно к направлению тока или параллельно ему.

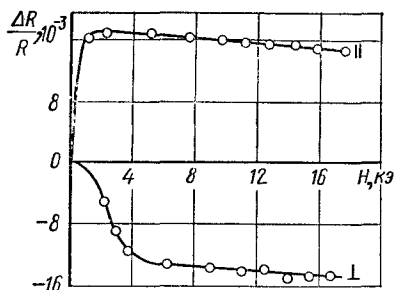


Рис. 26.34. Поперечное и продольное магнетосопротивление никеля при температуре 20° С [181].

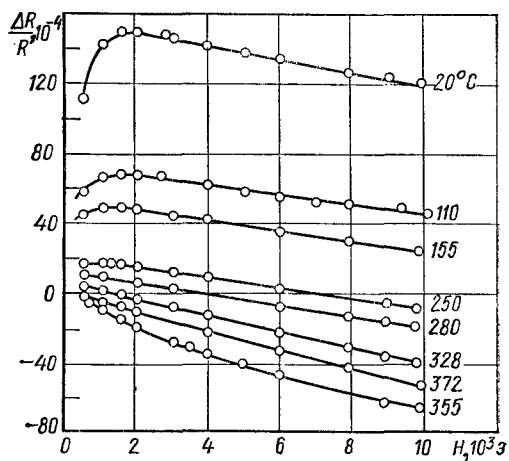
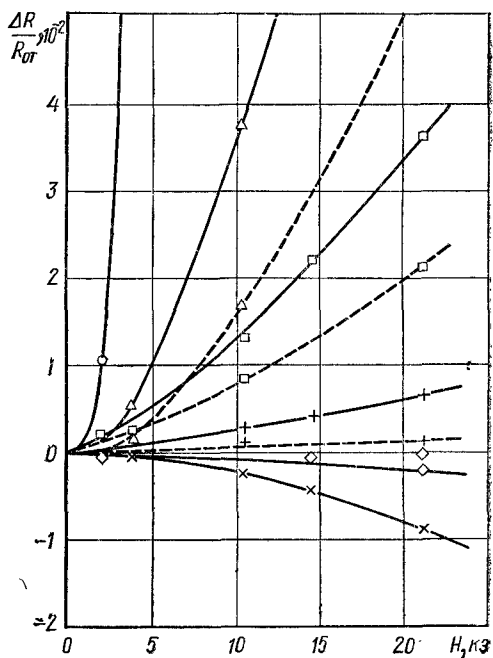
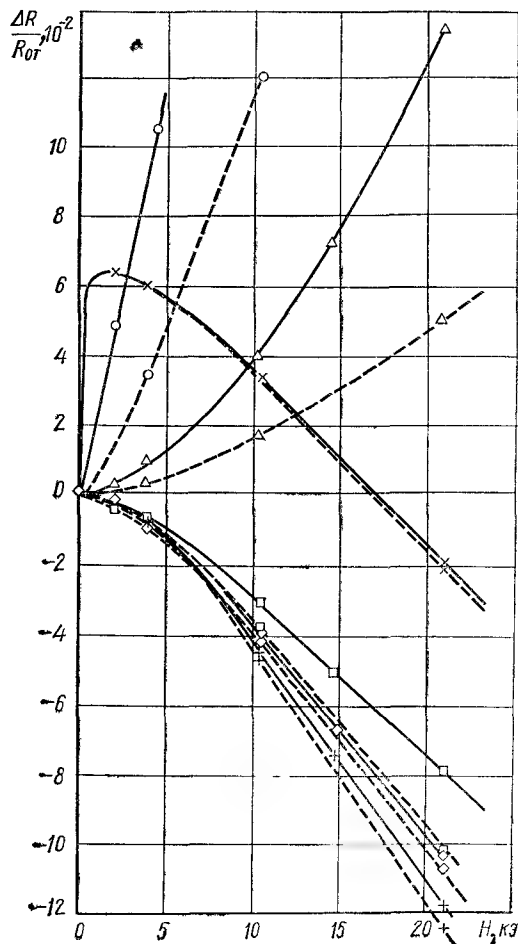


Рис. 26.35. Магнетосопротивление никеля при различных температурах [177].



○ — Ag ; Δ — Ag+0,02% Mn;
 □ — Ag+0,05% Mn; + — Ag+0,155% Mn;
 ◇ — Ag+0,24% Mn; × — Ag+0,61% Mn.

Рис. 26.36. Магнетосопротивление сплава Ag — Mn в поперечном (сплошная кривая) и продольном (пунктир) магнитных полях при 20 (а) и 4,09° К (б) [173] (указано атомное содержание компонента).



б

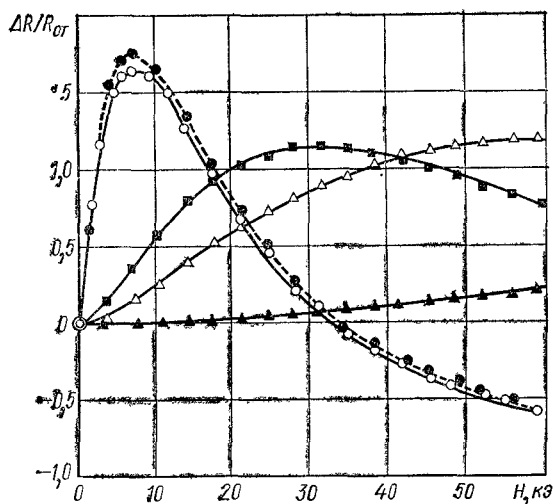


Рис. 26.37. Продольное магнетосопротивление $\Delta R/R_{0T}$ монокристалла сурьмы при различных температурах (главная ось перпендикулярна к направлению тока) [178]:
 $\blacktriangle$ — 300°K; $\triangle$ — 78°K; $\blacksquare$ — 52°K; $\circ$ — 4,22°K; $\bullet$ — 1,52°K.

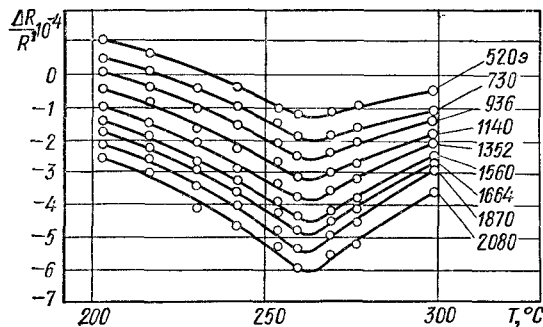


Рис. 26.38. Зависимость магнетосопротивления в области точки Кюри при различных полях для сплава 36% Ni, 64% Fe от температуры [181].

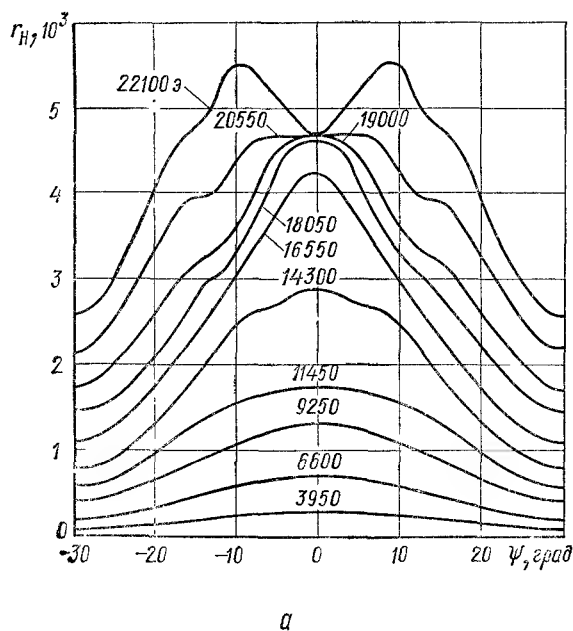
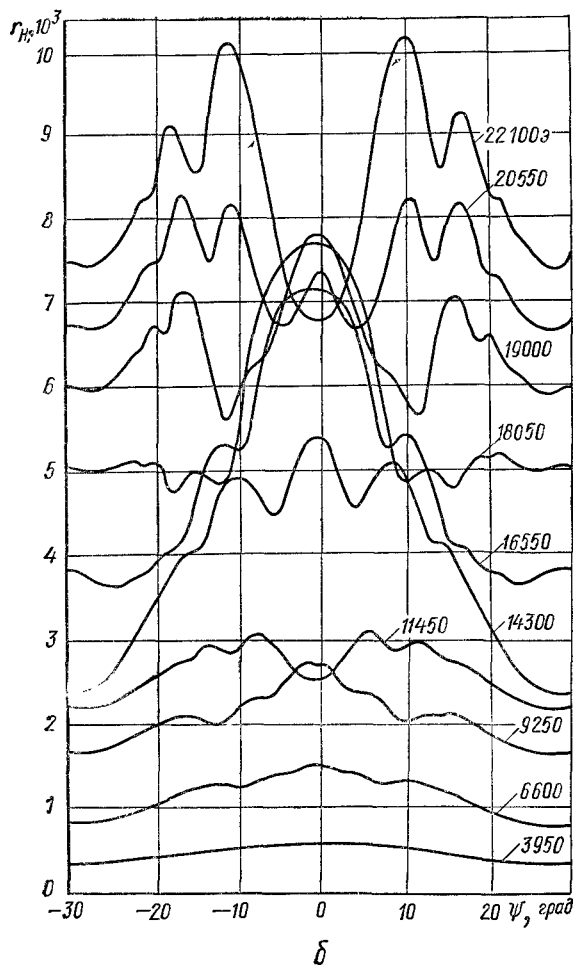


Рис. 26.39. Зависимость $r_H = R_{HT}/R_{0273,2}$ от ориентации магнитного поля относительно бинарной оси для монокристалла висмута при 14,15° (а) и 4,22° К (б) (главная ось параллельна направлению тока [179]).



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smith A. W. "Phys. Rev.", 1916, v. 8 (2), p. 79.
2. Studer F. J., Williams W. D. "Phys. Rev.", 1935, v. 47, p. 291.
3. Факидов И. Г. «Докл. АН СССР», 1948, т. 63, с. 123.
4. Боровик Е. С. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1952, т. 23, с. 83.
5. Боровик Е. С. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1954, т. 27, с. 355.
6. Frank V., Jeppesen O. G. "Phys. Rev.", 1953, v. 89, p. 1153.
7. Unwin F. "Proc. Roy. Soc. Edinburgh", 1913, v. 34, p. 208.
8. Frank V. "Appl. Scient. Res.", 1958, v. B7, p. 41.
9. Kevane C. J., Legvold S., Spedding F. H. "Phys. Rev.", 1953, v. 91, p. 1372.
10. Волкенштейн Н. В., Галошина Э. В. «Физика металлов и металловедение», 1967, т. 24, № 6, с. 1105.
11. Lee R. S., Legvold S. "Phys. Rev.", 1967, v. 162, N 2, p. 434.
12. Zecchina L. "Phys. St. Sol.", 1970, v. 42, p. K 153.
13. Anderson G. S., Legvold S., Spedding F. H. "Phys. Rev.", 1959, v. 111, N 5, p. 257.
14. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 3213.
15. Foner S. "Phys. Rev.", 1953, v. 91, p. 447; 1957, v. 107, p. 1513.
16. Scovil G. W. "Appl. Phys. Lett.", 1966, v. 9, p. 24.
17. Roesch L., Willens R. M. "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 2159.
18. Волков Д. Н., Козлова Т. М., Прудников В. Н. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1968, т. 55, с. 2103.
19. Волкенштейн Н. В., Галошина Э. В. «Физика металлов и металловедение», 1964, т. 18, с. 784.
20. Bodine J. H. "Phys. Rev.", 1956, v. 102, p. 1459.
21. Амитин Е. Б., Ковалевская Ю. А., Ковдря Ю. З. «Физика твердого тела», 1967, т. 9, с. 905.
22. Smith A. W. "Phys. Rev.", 1915, v. 5, p. 35.
23. Boeschoten F., Huiszoon C. "Physica", 1957, v. 23, p. 704.
24. Zahn H., Schmidt H. "Der Deutsch. Phys. Ges.", 1907, Bd 9, S. 98.
25. Aschermann G., Justi E. "Phys. Z.", 1942, Bd 43, S. 207.
26. Justi E. "Z. Naturforsch.", 1949, Bd 4a, S. 472.
27. Gehlhoff P. O., Justi E. "Z. Naturforsch.", 1949, Bd 4a, S. 561.
28. Hall E. H. "Phys. Rev.", 1925, v. 26, p. 820.
29. Zahn H. "Ann. Physik", 1905, Bd 16, S. 148.
30. Frank V. "Appl. Scient. Res.", 1957, v. B6, p. 379.
31. Hall E. H. "Proc. Nat. Acad. Sci.", 1937, v. 23, p. 600.
32. Alderson J. E., Farrel T., Hurd C. M. "Phys. Rev.", 1968, v. 174, p. 729.
33. Unwin F. "Proc. Roy. Soc. Edinburgh", 1920, v. 41, p. 44.
34. Gate S. E., Evans J. «Philos. Mag.», 1935, v. 19, p. 773.
35. Киикоин И. К., Факидов И. Г. "Z. Physik", 1931, Bd 71, S. 393.
36. Fakidov J. "Phys. Z. Soviet Union", 1935, v. 7, p. 677.
37. Боровик Е. С. "Изв. АН СССР. Сер. физ.", 1955, т. 19, с. 429.
38. Andrewartha G. G., Evans E. J. "Philos. Mag.", 1941, v. 31, p. 265.
39. Harnst W. "Wied. Ann. Physik", 1887, Bd 31, S. 760.
40. Onnes H., Kamerlingh, K. Hof. "Proc. Amsterdam", 1914, v. 17, p. 520.
41. Носков М. М. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1938, т. 8, с. 717.
42. Андреев А. А., Регель А. Р. «Физика твердого тела», 1966, т. 8, с. 3681.
43. Cusack N., Kendall P. "Philos. Mag.", 1961, v. 6, p. 419.
44. Greenfield A. J. "Phys. Rev.", 1964, v. 135, p. 6A.
45. Busch G., Tietche Y. "Phys. Kondens. Mater.", 1963, v. 1, p. 78.
46. Salkovitz E. I., Schindler A. I., Kammer E. W. "Phys. Rev.", 1957, v. 105, p. 887.
47. Köster W., Frei A. "Z. Metallkunde", 1953, Bd 44, S. 495.
48. Powell H., Evans E. J. "Philos. Mag.", 1943, v. 34, p. 145.
49. Cohen J. "Compt. rend.", 1956, v. 243, p. 1105.
50. Allison F. E., Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1957, v. 107, p. 103.
51. Сидоров С. К. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1946, т. 16, с. 629.
52. Комар А. П., Сидоров С. К. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1941, т. 11, с. 711.
53. Jeppesen O. J. "Nature", 1954, v. 173, p. 591.
54. Richards W., Evans E. J. «Philos. Mag.», 1932, v. 13, p. 201.
55. John W. G., Evans E. J. "Philos. Mag.", 1937, v. 23, p. 1033.
56. Новогрудский В. Н., Факидов И. Г. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 1095.
57. Cox W. R., Hayex D. J. "Phys. Rev." B, 1973, v. 7, p. 3580.
58. Прудников В. Н., Волков Д. И., Козлова Т. М. «Физика металлов и металловедение», 1970, т. 30, № 1, с. 31.
59. Little N. C. "Phys. Rev.", 1926, v. 28, p. 418.
60. Zahn H. "Ann. Phys.", 1904, Bd 14, S. 886.
61. Muldower L. "Phys. Rev.", B, 1973, v. 7, p. 4464.
62. Kapitza P. "Proc. Roy. Soc. (London)", 1928, v. A 119, p. 358.
63. Stephens E. "Philos. Mag.", 1930, v. 9, p. 517.
64. Smith A. W. "Phys. Rev.", 1911, v. 32, p. 1 8.
65. Steele M. C. "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 1751.
66. Thompson N. "Proc. Roy. Soc. (London)", 1938, v. A164, p. 24.
67. Okado T. "Memoris Faculty Sci. Kyushu Univ.", 1955, v. B1, p. 157.
68. Okado T. "J. Phys. Soc. Japan", 1956, v. 11, p. 89.
69. Brodie L. C. "Phys. Rev.", 1954, v. 93, p. 935.
70. Marcus J. A. "Phys. Rev.", 1955, v. 98, p. 1540.
71. Reynolds J. M., Hemstreet H. M. "Phys. Rev.", 1954, v. 96, p. 1203.
72. Reynolds J. M., Leinhardt T. E. "Phys. Rev.", 1954, v. 93, p. 247.
73. Overton V. C., Berlincourt T. G. "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 1165.
74. Stephens E., Evans E. J. "Philos. Mag.", 1929, v. 7, p. 161.
75. Van Aubel E. "Compt. rend.", 1936, v. 203, p. 614.
76. Киикоин И. К., Лазарев Б. Г. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1933, т. 3, с. 44; "Nature", 1932, v. 129, p. 57; "Phys. Z. Soviet Union", 1933, Bd 3, S. 351; 1933, Bd 4, S. 567.
77. Иванов Г. А., Регель А. Р. «Журн. техн. физ.», 1955, т. 25, с. 39.
78. Иванов Г. А., Регель А. Р. «Журн. техн. физ.», 1955, т. 25, с. 49.
79. Gabe S., Evans E. J. "Philos. Mag.", 1935, v. 19, p. 773.
80. Thomas W. R., Evans E. J. "Philos. Mag.", 1934, v. 17, p. 65.
81. Thomas W. R., Evans E. J. "Philos. Mag.", 1933, v. 16, p. 329.
82. Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1928, v. 32, p. 824.

83. Butler E. H., Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1940, v. 57, p. 916.
84. Jan J. P., Gijsman H. M. "Physica", 1952, v. 18, p. 339.
85. Jan J. P. "Helv. Phys. Acta", 1952, v. 25, p. 677.
86. Foner S. "Phys. Rev.", 1956, v. 101, p. 1648.
87. Smith A. W. "Phys. Rev.", 1910, v. 30, p. 1.
88. Smith A. W. "Phys. Rev.", 1911, v. 33, p. 295.
89. Hall E. H. "Phys. Rev.", 1925, v. 26, p. 820.
90. Foner S., Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1953, v. 91, p. 20.
91. Rindner W., Koch K. M. "Z. Naturforsch.", 1958, Bd 13a, S. 26.
92. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В., Вонсовский С. В. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1958, т. 35, с. 85.
93. Moreau G. "J. Physica", 1900, v. 9, p. 497.
94. Smith A. W. "Phys. Rev.", 1913, v. 1, p. 339.
95. Комар А. П., Портнягина И. И. «Докл. АН СССР», 1948, т. 60, с. 569.
96. Smit J. "Physica", 1955, v. 21, p. 877.
97. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1960, т. 38, с. 61.
98. Dheer P. N. "Phys. Rev.", 1967, v. 156, p. 637.
99. Черемушкина А. В., Васильева Р. П. «Физика твердого тела», 1966, т. 8, с. 822.
100. Smith A. W. "Phys. Rev.", 1916, v. 8, p. 79.
101. Черемушкина А. В., Королева М. И. «Вестн. МГУ», 1966, № 5, с. 118.
102. Smith A. W. "Phys. Rev.", 1921, v. 17, p. 23.
103. Foner S. "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 1079.
104. Soffer S. e. a. "Phys. Rev.", 1965, v. 140, p. A668.
105. Бажанова Н. В. «Физика металлов и металловедение», 1964, т. 17, с. 774.
106. Факидов И. Г., Гражданкина Н. П., Кикоин А. К. «Докл. АН СССР», 1949, т. 68, с. 491.
107. Andres M. P. de, Jellighaus W. "Inst. hiergo y asero", 1956, v. 9, p. 626.
108. Kooi C. "Phys. Rev.", 1954, v. 95, p. 843.
109. Черемушкина А. В., Архипов Ю. Н., Саркисова К. Н. «Изв. вузов. Физика», 1968, т. 6, с. 156.
110. Schröder K. "Phys. Rev.", 1964, v. 135, p. A 149.
111. Carter G. C. Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1966, v. 152, p. 489.
112. Черемушкина А. В., Архипов Ю. Н. «Вестн. МГУ», 1966, № 4, с. 101.
113. Черемушкина А. В. «Вестн. МГУ», 1957, № 2, с. 127.
114. Свирина Е. П., Сирота З. Д. «Вестн. МГУ», 1960, № 6, с. 27.
115. Pugh E. M., Rostoker H. "Rev. Mod. Phys.", 1953, v. 25, p. 161.
116. Köster W., Rocholl P. "Z. Metallkunde", 1957, Bd 48, S. 485.
117. Foner S., Allison F. E., Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1958, v. 109, p. 1129.
118. Кикоин И. К. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1940, т. 10, с. 1242.
119. Allison F. E., Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1956, v. 102, p. 1281.
120. Dutta S. K., Subrahnnayam A. V. "Phys. Rev.", 1969, v. 117, p. 177.
121. Кикоин И. К., Факидов И. Г. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1941, т. 11, с. 113.
122. Obata J. "Japan J. Physics", 1927, v. 4, p. 43.
123. Etingshausen A. von, Nernst W., Sitzungsler K. "Akad. Wiss. Wien", 1886, Bd 94, S. 560.
124. Foner S., Pugh E. "Phys. Rev.", 1953, v. 91, p. 20.
125. Beitel A. F., Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1958, v. 112, p. 1516.
126. Федоров Г. В., Рябинина Н. М. «Физика металлов и металловедение», 1970, т. 29, с. 83.
127. Huguenin R., Rivier D. "Helv. Phys. Acta", 1965, v. 38, p. 900.
128. Васильева Р. П., Акмурзаев Б., Кондорский Е. М. «Вестн. МГУ», 1970, т. 4, с. 459.
129. Sanford E. R., Ehrlich A. C., Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1961, v. 123, p. 1947.
130. Жукова В. М., Фадин В. П. «Изв. вузов. Физика», 1970, № 3, с. 21.
131. Свирина Е. П., Немчинов Ю. В. «Физика твердого тела», 1967, т. 9, с. 704.
132. Бабушкина Н. А. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 3026.
133. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В. «Физика металлов и металловедение», 1964, т. 18, с. 26.
134. Волкенштейн Н. В., Григорова И. К., Федоров Г. В. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1966, т. 50, с. 1525.
135. Wald F. J., Juretschke H. J. "Phys. Rev.", 1971, v. B3, p. 2412.
136. Lee R. S., Legvold S. "Phys. Rev.", 1967, v. 162, p. 431.
137. Potter H. N. "Philos. Mag.", 1932, v. 31, p. 233.
138. Rhyne I. J. "J. Appl. Phys.", 1969, v. 40, p. 1001.
139. Федоров Г. В., Волкенштейн Н. В. «Физика твердого тела», 1970, т. 12, с. 1374.
140. Волкенштейн Н. В., Григорова И. К., Федоров Г. В. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1966, т. 51, с. 780.
141. Rhyne I. J. "Phys. Rev.", 1969, v. 172, p. 523.
142. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В. «Физика твердого тела», 1966, т. 8, с. 1895.
143. Волков Д. И., Козлова Т. М. «Физика металлов и металловедение», 1965, т. 20, с. 355.
144. Бабушкина Н. А. «Физика твердого тела», 1971, т. 10, с. 3026.
145. Zahn H., Schmidt. "Der. Deutsch. Phys. Ges.", 1907, Bd 9, S. 98.
146. Кикоин И. К., Бабушкина Н. А., Игошева Т. Н. «Физика металлов и металловедение», 1960, т. 10, с. 488.
147. Кикоин И. К., Буряк Е. М., Муромкин Ю. А. «Докл. АН СССР», 1959, т. 125, с. 1011.
148. Schröder K. "Phys. Rev.", 1964, v. 135, p. 149.
149. Новогрудский В. Н., Факидов И. Г. «Физика твердого тела», 1961, т. 3, с. 3278.
150. Карчевский А. И., Николаев В. И. «Физика металлов и металловедение», 1961, т. 2, с. 519.
151. Новогрудский В. Н., Факидов И. Г. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1964, т. 47, с. 40.
152. Kapitza P. "Proc. Roy. Soc. (London)", 1929, v. A 123, p. 292, 342.
153. Justi E. "Ann. Physik", 1948, Bd (6) 3, S. 183.
154. Grüneisen E., Erling H. D. "Ann. Physik", 1940, Bd (5) 38, S. 399.
155. Justi E., Kramer J. "Physikal Z.", 1940, Bd 41, S. 197.
156. Haas W. J. de, Van Alphen P. M. «Proc. Amsterdam», 1933, v. 36, p. 253; «Comm. Kamerlingh Onnes Lab. Leiden», 1933, Nr. 225a.
157. Justi E. "Physikal Z.", 1940, Bd 41, S. 486.
158. Grüneisen E., Adenstedt A. "Ann. Physik", 1938, Bd 5(31), S. 714.
159. Aschermann G., Justi E. "Physikal Z.", 1942, Bd 43, S. 207.
160. Stierstadt O. "Z. Physik", 1931, Bd 67, S. 725.
161. Bates L. F. "Proc. Phys. Soc. (London)", 1946, v. 58, p. 153.
162. Justi E. "Z. Naturforsch.", 1949, Bd 4a, S. 472.
163. Schulze R. "Physik. Z.", 1941, Bd 42, S. 297.
164. Meißner W., Scheffers H. "Physik. Z.", 1929, Bd 30, S. 827.
165. Haas W. J. de, Blom J. W. "Physika", 1933/34, v. 1, p. 465.

166. Foroud A., Justi E., Kramer J. "Physikal. Z.", 1940, Bd 41, S. 113.
167. Van Alphen P. M. Diss. Leiden, 1933.
168. Rausch K. "Ann. Physik", 1947, Bd (6)1, S. 190.
169. Erling H. D., Grüneisen E. "Ann. Physik", 1942, Bd (5)41, S. 89.
170. Justi E., Scheffers H. "Physikal. Z.", 1937, Bd 38, S. 891.
171. Stierstadt O. "Z. Phys.", 1930, Bd 65, S. 575.
172. Olsen J. L., Rinderer L. "Nature", 1954, v. 173, p. 682.
173. Gerritsen A. N., Linde J. O. "Physika", 1951, v. 17, p. 573.
174. Kaye G. W. C. "Proc. Roy. Soc.", 1939, v. A 170, p. 561.

175. Stierstadt O. "Z. Phys.", 1933, Bd 80, S. 636.
176. Haas W. J. de, Blom J. W. "Physika", 1937, v. 4, p. 778.
177. Белов К. П. Упругие тепловые и электрические явления в ферромагнетиках. М., Изд-во иностр. лит., 1957.
178. Steele M. C. "Phys. Rev.", 1955, v. 97, p. 1720.
179. Haas W. J. de, Blom J. W., Schubnikov L. "Physika", 1935, v. 2, p. 453.
180. Giauque W. F., Stout J. W., Clark C. W. "Phys. Rev.", 1937, v. 51, p. 1108.
181. Белов К. П. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1951, т. 21, с. 809.

ГЛАВА 27

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ДИА- И ПАРАМАГНЕТИКОВ

Магнитная восприимчивость единицы объема χ_v определяется отношением $\chi_v = M/H$, где M — магнитный момент единицы объема, H — напряженность магнитного поля.

Вещества с отрицательной магнитной восприимчивостью называются диамагнитными ($\chi < 0$), а с положительной — парамагнитными ($\chi > 0$).

Для характеристики магнитных свойств используется удельная магнитная восприимчивость вещества (т. е. магнитная восприимчивость на единицу массы) $\chi = \chi_v/\rho$, где ρ — плотность.

Часто магнитную восприимчивость относят к одному молю вещества (χ_m). Между величинами χ и χ_m существует следующее соотношение: $\chi_m = \chi M$; здесь M — относительная молекулярная масса. Значения χ в таблицах даны в системе СГСМ ($\text{см}^3/\text{г}$). Для пересчета в систему СИ нужно значение величины χ , выраженное в системе СГСМ, умножить на 10^{-3} .

Принятые сокращения: газообразный — (г.); жидкий — (ж.); твердый — (тв.); p — концентрация дырок в полупроводнике; n — концентрация электронов в полупроводнике.

Таблица магнитной восприимчивости диа- и парамагнитных веществ

Вещество	$T, ^\circ\text{K}$	$\chi, 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	Литература
H	293	-1,9867	[1]
	90	-1,97	[1]
H ₂ O*	293	-0,7019 (тв.)	[2]
	273	-0,7177 (ж.)	[2]
	293	-0,7220	[2]
	413	-0,727	[2]
	0—153	-0,699 (тв.)	[3]
	293	-0,72183 (ж.)	[4]
	313	-0,72286	[4]
	373	-0,72454	[4]
D ₂ O	293	-0,638	[5]
H ₃ AsO ₃	293	-0,406 (тв.)	[6]
H ₃ BO ₃	295	-0,562 (тв.)	[6]
HBr2*	300	-0,427	[6]
HCl	300	-0,602	[6]
HI	297	-0,418	[6]
H ₃ PO ₃	297	-0,518	[6]
H ₃ PO ₄	298	-0,481	[6]

Продолжение табл.

Вещество	$T, ^\circ\text{K}$	$\chi, 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	Литература
H ₂ SO ₄	297	-0,395	[6]
H ₂ SeO ₃	290	-0,368 (тв.)	[6]
H ₂ SeO ₄	298	-0,353	[6]
H ₂ TeO ₃	288	-0,24	[7]
H ₂ TeO ₄	291	-0,43	[7]
He	293	-1,906	[1]
	90	-1,91	[1]
Li3*	14	3,6	[9]
	293	3,6	[9]
	298	3,35	[8]
LiCH ₃ COO	283	-0,513	[6]
Li ₂ CO ₃	296	-0,398	[6]
LiCl	287	-0,587	[6]
LiI	283,2	-0,417	[6]
LiNO ₃	292	-0,48	[7]
LiNO ₃ ·3H ₂ O	291	-0,326	[6]
Li ₂ O	293	-0,57	[7]
LiOH	283	-0,516	[6]
Li ₂ SO ₄ ·H ₂ O	290	-0,43	[7]
Li ₂ SO ₄	281,5	-0,378	[6]
	288	-0,38	[7]
Be (монокристалл) $\chi_{\parallel}^{40}$	293	-2,38	[10]
Be (монокристалл) $\chi_{\perp}$	293	-0,80	[10]
Be (поликристалл)	103	-0,75	[11]
	291	-1,0	[11]
	573	-1,2	[11]
	1200	-1,3	[11]
BeCO ₃ ·2BeO	288	-0,34	[7]
BeCl ₂	290	-0,60	[7]
Be(NO ₃) ₂ ·3H ₂ O	298	-0,311	[6]
Be(OH) ₂	290	-0,537	[12]
BeSO ₄	301	-0,354	[7]
BeSO ₄ ·4H ₂ O	290	-0,51	[7]
B	90	-0,63	[13]

* Температурный коэффициент $\frac{T}{\chi} \cdot \frac{d\chi}{dT}$ уменьшается от $2,9 \cdot 10^{-4}$ при 278°K до $0,62 \cdot 10^{-4}$ при 343°K [2].

** Измерения на растворе.

*** При уменьшении температуры от 298 до 78°K χ увеличивается на 1,3% [8].

**** См. рис. 27.1.

Вещество	$T, ^\circ\text{K}$	$\chi, 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	Литература
В	293	-0,62	[13]
	291	-0,71	[14]
	373	-0,73	[14]
	503	-0,76	[14]
	1373	-0,77	[14]
BCl_3	286	-0,530 (ж.)	[6]
B_2O_3	287	-0,55	[7]
H_3BO_3	293	-0,52	[15]
С (алмаз)	103	-0,49	[11]
	293	-0,491	[14]
	473	-0,50	[14]
	673	-0,51	[14]
	1173	-0,54	[14]
С (графит)	1473	-0,56	[14]
	14	-4,7	[16]
	289	-3,0	[16]
С (монокристалл) гексагон. осн ⊥ гексагон. осн	293	-22,8	[17]
	293	-0,4	[17]
	291	-0,442	[6]
	293	-0,4936	[19]
	293	-0,423 (г.)	[18]
	293	-0,54	[15]
	293	-0,426 (г.)	[11]
	298	-0,528	[20]
	88	-0,507	[20]
	289	-1,1 (г.)	[19]
	295	-48,66 (г.)	[18]
	132	-81,45	[21]
	292	-49,07 (г.)	[21]
	408	-3,26 (г.)	[18]
	285	-0,429 (ж.)	[18]
N_2O	289	-0,429 (г.)	[18]
	291	-0,206 (ж.)	[18]
	257	-0,276 (тв.)	[18]
N_2O_4	289	-0,332 (тв.)	[18]
N_2O_5	295	-0,467	[22]
HNO_3	296	-0,530	[6]
NH_4Br	285	-0,484 (тв.)	[6]
NH_4Cl	284	-0,640 (тв.)	[6]
NH_4F	298	-0,659 (тв.)	[6]
NH_4I	285	-0,455 (тв.)	[6]
$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	295	-0,538 (тв.)	[6]
$(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{PO}_4$	296	-0,50	[15]
NH_4NO_3	284	-0,421 (тв.)	[6]
NH_4OH	299	-0,784 (ж.)	[6]
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	287	-0,478	[6]
$(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$	294	-0,440	[6]
$(\text{NH}_4)_2\text{SbBr}_6$	293	-0,036	[23]
О I-я модификация	14	54 (тв.)	[24]
	33	60 (тв.)	[24]
	33	118 (тв.)	[24]
О II-я модификация	43	115 (тв.)	[24]
	54	113 (тв.)	[24]
	54	310	[24]
О (ж.)	60	295	[24]
	70	273	[24]
	77	260	[24]
O_3 (озон)	293	104,1 (г.)	[18]
	293	107,7 (г.)	[25]
	90	0,15 (г.)	[26]
Ne	90	0,14 (ж.)	[26]
	293	-0,33 (г.)	[27]

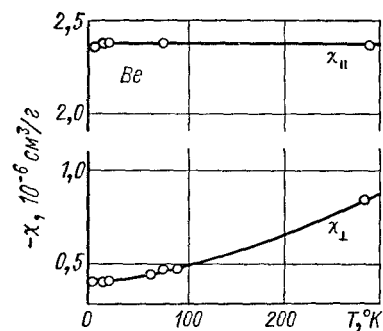
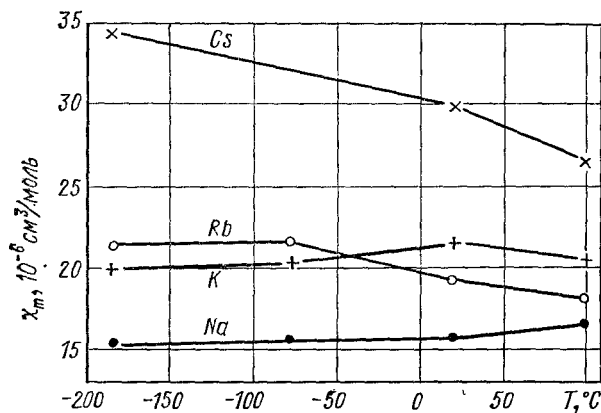
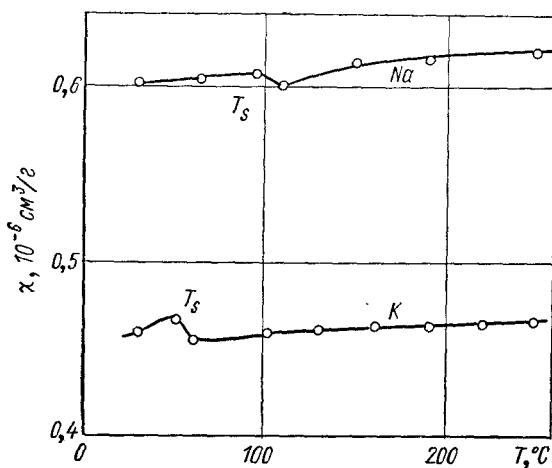
Рис. 27.1. Зависимость $\chi_{||}$ и $\chi_{\perp}$ для Be от температуры [10].Рис. 27.2. Зависимость χ_m для Cs, Rb, Na, K от температуры [103, 165].

Рис. 27.3. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Na, K от температуры [28, 103].

Продолжение табл.

Вещество	$T, ^\circ K$	$\chi, 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	Литература
Na*	298	0,610	[8]
	78	0,582	[8]
	303	0,600	[28]
	523	0,620	[28]
NaOH	290	-0,59	[7]
	300	-0,395 ^{2*}	[6]
NaF	302	-0,465 (тв.)	[6]
	294	-0,51	[7]
NaCl	123	-0,501	[29]
	282	-0,506 (тв.)	[6]
	291	-0,499	[29]
	635	-0,499	[29]
	1206	-0,508	[29]
NaClO ₃ ^{2*}	298	-0,356 ^{2*}	[6]
NaBr	291	-0,47	[7]
NaBr · 2H ₂ O ^{2*}	291	-0,420	[6]
NaI · 2H ₂ O ^{2*}	300	-0,405	[6]
NaHCO ₃	293	-0,21	[15]
NaHPO ₄	293	-0,399	[12]
NaHPO ₄ · H ₂ O	296	-0,438 (тв.)	[6]
NaH ₂ PO ₂	293	-0,381	[12]
NaNO ₃	293	-0,28	[15]
	295	-0,301	[6]
NaPO ₃	292	-0,384	[6]
NaCH ₃ COO · 3H ₂ O	282	-0,483	[6]
NaC ₂ H ₃ O ₂ · 3H ₂ O	293	-0,50	[15]
Na ₂ HPO ₃	293	-0,457	[12]
Na ₂ CO ₃	284	-0,412 (тв.)	[6]
	290	-0,24	[7]
Na ₂ CO ₃ · 10H ₂ O	290	-0,58	[7]
Na ₂ SO ₃ · 7H ₂ O	293	-0,462	[12]
Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	293	-0,86	[15]
	298	-0,385 (тв.)	[6]
Na ₂ S ₂ O ₃	293	-0,391	[12]
Na ₂ S ₂ O ₃ · 3H ₂ O	290	-0,368 (тв.)	[6]
Na ₂ S ₂ O ₄	294	-0,352	[6]
Na ₂ TeO ₃	283	-0,328 (тв.)	[6]
Na ₂ B ₄ O ₇ · 10H ₂ O	293	-0,59	[15]
CH ₃ AsO (ONa) ₂ · H ₂ O	293	-0,529	[12]
SnO (ONa) ₂ · 3H ₂ O	293	-0,370	[12]
Mg^{3*} (поликристалл)	1,2	0,25	[31]
	14	1,13	[16]
	289	0,49	[16]
	291	0,26	[11]
	293	0,25	[31]
	293	0,46	[30]
	293	0,46	[30]
Mg (монокристалл) $\chi_{ }$			
M₃ (монокристалл) $\chi_{\perp}$	293	0,46	[30]
MgBr ₂	293	-0,57	[7]
MgCO ₃	286	-0,381	[6]
MgCO ₃ · 3H ₂ O	293	-0,525	[12]
Mg (C ₂ H ₅ SO ₂) ₂ · 2H ₂ O	293	-0,525	[12]
MgCl ₂ ^{2*}	288	-0,620	[6]
MgCl ₂ · 6H ₂ O	291	-0,57	[7]
Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O ^{2*}	291	-0,287	[6]
MgO	290	-0,25	[7]

* См. рис. 27.2, 27.3.

^{2*} Измерения на растворе.

^{3*} См. рис. 27.4.

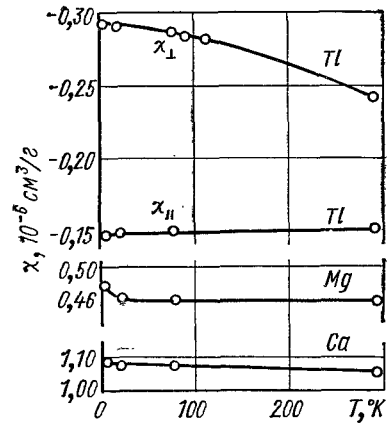


Рис. 27.4. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Ca, Mg, Tl от температуры [30].

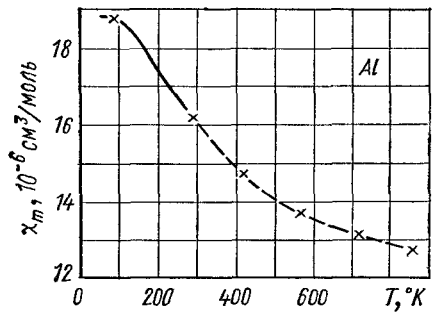


Рис. 27.5. Зависимость χ_m для Al от температуры [30].

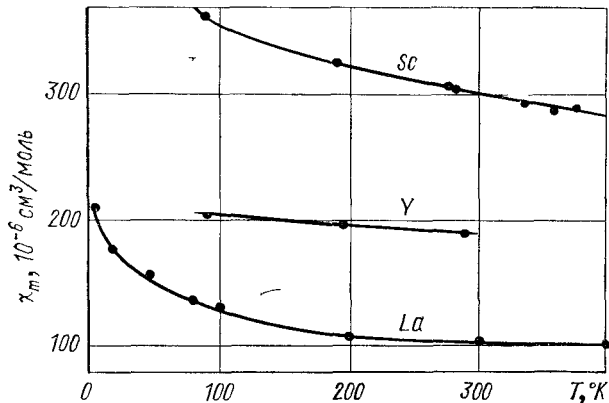


Рис. 27.6. Зависимость χ_m для La, Sc, Y от температуры: La [46, 123]; Sc, Y [46, 103].

Вещество	T, °K	χ , 10^{-6} см ³ /г	Литература	Вещество	T, °K	χ , 10^{-6} см ³ /г	Литература
Mg(OH) ₂	288	-0,377	[6]	K	303	0,460	[28]
MgSO ₄ *	293	-0,45	[32]		523	0,467 (ж.)	[28]
MgSO ₄ ·7H ₂ O	284	-0,342	[6]	KF	298	0,46	[8]
Al ²⁺ , 3*	293	0,60	[33]	KCl	298	-0,443	[6]
AlBr ₃	291	0,65	[14]	KClO ₃	283	-0,481	[6]
AlCl ₃	292	-0,32	[7]	KBr	293	-0,30	[15]
Al ₂ O ₃	292	-0,60	[7]	KBrO ₃	296	-0,404	[6]
Al ₂ O ₃ ·2H ₂ O	293	-0,098	[34]	KI	295	-0,323	[6]
Al ₂ (SO ₄) ₃	293	-0,337	[34]	KIO ₄	291	-0,405	[6]
Si, $\rho < 5 \cdot 10^{13}$ см ⁻³	291	-0,48	[7]	KOH*	295	-0,292	[6]
$n=5,4 \cdot 10^{13}$ см ⁻³	293	-0,111	[35]	KHF ₂	288,5	-0,390	[6]
$n=5,4 \cdot 10^{18}$ см ⁻³	141	-1,23 · 10 ⁻²	[36]	KCN	293	-0,428	[22]
$n=5,4 \cdot 10^{18}$ см ⁻³	297	-8,5 · 10 ⁻³	[36]	KCN	293	-0,465	[41]
$n=2,8 \cdot 10^{18}$ см ⁻³	141	-8,0 · 10 ⁻³	[36]	KH ₂ PO ₄	290	-0,435	[6]
$n=2,8 \cdot 10^{13}$ см ⁻³	297	-3,9 · 10 ⁻³	[36]	KH ₂ AsO ₄	298	-0,390	[6]
$\rho=8,48 \cdot 10^{13}$ см ⁻³	141	+5,18 · 10 ⁻³	[36]	KNO ₃	293	-0,336	[6]
$\rho=8,48 \cdot 10^{18}$ см ⁻³	297	+3,34 · 10 ⁻³	[36]	(KSO ₃)·NOH	293	-0,401	[12]
$\rho=5,6 \cdot 10^{18}$ см ⁻³	141	+3,94 · 10 ⁻³	[36]	K ₂ CO ₃ *	286	-0,412	[6]
$\rho=5,6 \cdot 10^{18}$ см ⁻³	297	+2,2 · 10 ⁻⁴	[36]	K ₂ SO ₄	289	-0,385	[6]
$\rho=4,7 \cdot 10^{18}$ см ⁻³	141	4,22 · 10 ⁻³	[36]	K ₂ S ₂ O ₃	299	-0,393	[6]
$\rho=4,7 \cdot 10^{18}$ см ⁻³	297	3,22 · 10 ⁻⁴	[36]	K ₂ S ₂ O ₅	295	-0,389	[6]
$\rho=4,31 \cdot 10^{18}$ см ⁻³	141	3,42 · 10 ⁻³	[36]	K ₂ S ₄ O ₆	293	-0,412	[12]
$\rho=4,31 \cdot 10^{18}$ см ⁻³	297	6,7 · 10 ⁻⁵	[36]	K ₂ S ₂ O ₇	295	-0,398	[6]
$\rho=3 \cdot 10^{17}$ см ⁻³	297	-1,22 · 10 ⁻⁴	[36]	K ₂ S ₂ O ₈	293	-0,371	[12]
SiCl ₄	292	-0,514	[6]	K ₂ SiO ₃ *	299	-0,383	[6]
SiO ₂	293	-0,493	[37]	K ₂ SO ₄ Al ₂ (SO ₄) ₃	113,4	-0,480	[29]
SiO(OH) ₂	293	-0,427	[37]		189	-0,476	[29]
Si ₂ O(OH) ₆	293	-0,429	[37]		290	-0,470	[29]
SiOH ₄	293	-0,443	[37]	K ₂ SO ₄ ·Al ₂ (SO ₄) ₃ ·24H ₂ O	293	-0,579	[43]
Si(OC ₂ H ₅) ₄	293	-0,663	[37]	K ₃ Mn(CN) ₆	292,1	13,48	[167]
Si ₂ O(OC ₂ H ₅) ₆	293	-0,635	[37]	K ₃ Fe(CN) ₆ ·CO	293	-0,26	[44]
P черный	293	-0,86	[12]	K ₄ Fe(CN) ₆ ·3H ₂ O	293	-0,420	[79]
P белый	103	-0,90	[11]	KCH ₃ COO*	283	-0,485	[6]
	317	-0,90	[11, 14]	KNa(C ₄ H ₄ O ₆)	293	-0,54	[42]
P красный	293	-0,67	[14]	Ca ⁵⁺ (поликристалл)	291	1,1	[11]
	318	-0,90 (ж.)	[14]	Ca (монокристалл) $\chi_{ }$	293	1,05	[30]
	393	-0,90 (ж.)	[14]	CaCO ₃	294	-0,354	[6]
PCl ₃	292	-0,463	[6]	Ca(CH ₂ COO) ₂	283	-0,446	[6]
PCl ₅	298	-0,490	[6]	CaCl ₂	290	-0,49	[17]
P ₂ O ₅	291	-0,46	[7]	CaCl ₂ ·6H ₂ O	288	-0,462	[6]
POCl ₃	286	-0,449	[6]	CaF ₂	293	-0,360	[12]
S (ромбическая)	293	-0,487	[38]	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	291	-0,282	[6]
S (моноклинная)	293	-0,462	[38]	CaO	289	-0,27	[7]
SCl ₂	285	-0,479	[6]	Ca(OH) ₂	298	-0,288	[6]
SF ₆	293	-0,301 (ж.)	[39]	CaSO ₄	293	-0,364	[12]
SOCl ₂	287	-0,451	[6]	CaSO ₄ ·H ₂ O	293	-0,384	[12]
SO ₂ Cl ₂	283	-0,402	[6]	CaSO ₄ ·1/2(H ₂ O)	288	-0,344	[6]
Cl	213	-0,57 (ж.)	[19]	Sc ⁶⁺	90	8,2	[46]
Ag	90	-0,49 (г.)	[1]		292	7,0	[46]
	293	-0,48 (г.)	[1]	Sc ₂ (C ₂ O ₄) ₃	293	-0,25	[15]
K ⁴⁺	103—	0,52	[11, 14]	Sc ₂ O ₃	293	-0,018	[15]
	335		[14]	Sc ₂ (SO ₄) ₃	293	-0,33	[47]
	336	0,52 (ж.)	[14]	Ti (поликристалл) ^{7*}	293	3,36	[48]
	463	0,52 (ж.)	[14]	Ti (монокристалл) $\chi_{ }$	298	3,35	[49]
	293	0,532	[40]		573	3,65	[49]
				Ti (монокристалл) $\chi_{\perp}$	298	3,07	[49]

* Измерения на растворе.

** См. рис. 27.5.

** При плавлении (933°K) χ изменяется от $0,57 \cdot 10^{-6}$ до $0,46 \cdot 10^{-6}$ см³/г [90].** См. рис. 27.2, 27.3; при уменьшении температуры от 298 до 78°K χ уменьшается на 0,2% [8].

** См. 27.4.

** См. рис. 27.6.

** См. рис. 27.7.

Вещество	$T, ^\circ\text{K}$	$\chi, 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	Литература
TiC*	573	3,38	[49]
TiCl ₄	293	0,6	[50]
TiF ₃	308	-0,287	[52]
TiN*	300	11,9	[51]
	293	1,00	[50, 53]
TiO ₂	293	0,066	[54]
Ti ₃ O ₅	293	8,1	[54]
TiS ₂	293	0,56	[54]
Ti ₂ S ₃	293	0,91	[54]
V ₂ S ₃ *	293	5,30	[55]
VClNO	298	5,0	[56]
V ₂ Cl ₇ NO	298,5	10,504	[57]
V ₂ Cl ₈ (NO) ₅	298,5	10,998	[57]
Cu ³⁺ *	298,5	5,944	[57]
	296	-0,0860	[58]
	295	-0,0859	[59]
	500	-0,0833	[59]
	900	-0,0767	[59]
CuCl	296	-0,385	[6]
Cu ₂ O	293	-0,185	[60]
Cu ₃ P ₂	291	-0,23	[7]
CuS	293	-0,03	[61]
Cu ₂ S	291	-0,18	[7]
CuSe	293	-0,14	[61]
Cu ₂ Se	291	-0,15	[7]
Zn ⁴⁺ (поликристалл)	293	-0,14	[62]
Zn (монокристалл) $\chi_{ }$	293	-0,169	[62]
Zn (монокристалл) $\chi_{\perp}$	293	-0,124	[62]
ZnO	293	-0,33...0,66	[65]
	293	-0,362	[22]
	292	-0,40	[7]
ZnBr ₂	286	-0,419	[6]
Zn(CH ₃ ·COO) ₂ ·2H ₂ O	288	-0,427	[6]
ZnCl ₂ ^{5*}	283	-0,333	[6]
Zn(NO ₃) ₂ ^{5*}	293	-0,76	[64]
Zn(OH) ₂	292	-0,277	[6]
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	80	-0,35	[65]
Ga ^{6*} (поликристалл)	290	-0,31	[65]
Ga (монокристалл)	303	+0,036 (ж.)	[65]
Ga (монокристалл)	303	+0,0003 (ж.)	[66]
оси a χ_a	80	-0,240	[65]
оси b χ_b	80	-0,467	[65]
оси c χ_c	80	-0,343	[65]
оси a χ_a	290	-0,150	[65]
оси b χ_b	290	-0,506	[65]
оси c χ_c	290	-0,278	[65]
оси a χ_a	298	-0,12	[66]
оси b χ_b	298	-0,42	[66]
оси c χ_c	298	-0,23	[66]
GaAs	293	-0,224	[2]
GaCl ₂	293	-0,45	[67]
GaI ₂	293	-0,33	[67]
GaN	293	-0,332	[2]
GaP	293	-0,274	[2]
GaSb	2937*	-0,201	[2]

* χ почти не зависит от T [50].

2* См. рис. 27.8.

3* См. рис. 27.9.

4* См. рис. 27.10.

5* Измерения на растворе.

6* См. рис. 27.11.

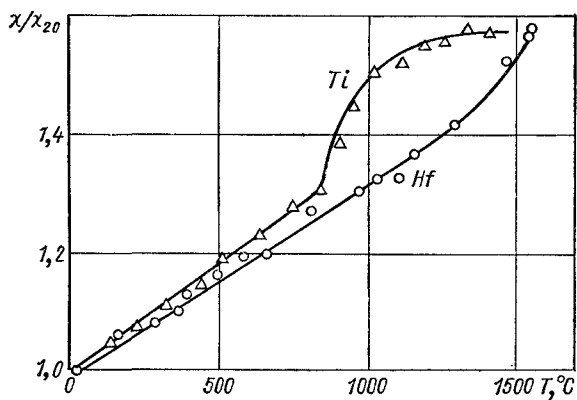
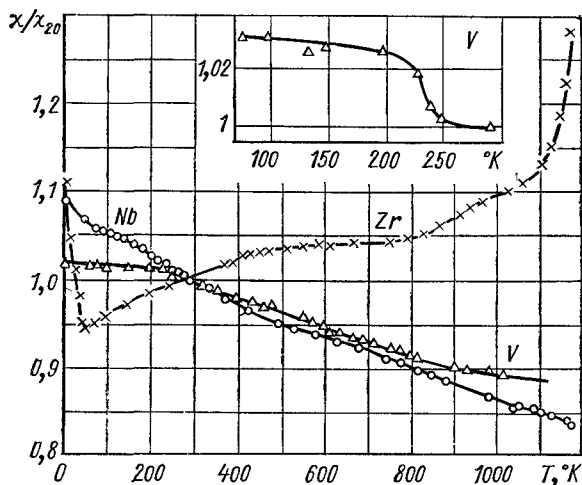
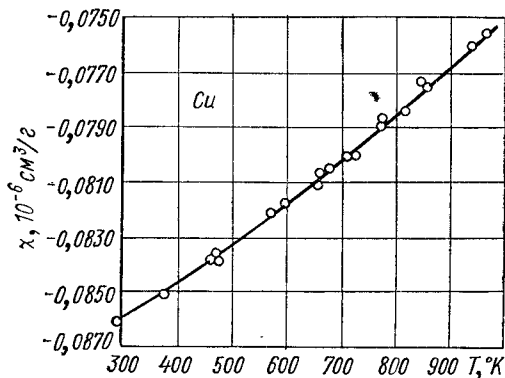
7* Концентрация дырок $p=6,4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.Рис. 27.7. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для Ti, Hf от температуры (χ_{20} — восприимчивость при 20° C) [48].Рис. 27.8. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для V, Zr, Nb от температуры (χ_{20} — восприимчивость при 20° C) [55].

Рис. 27.9. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Cu от температуры [59].

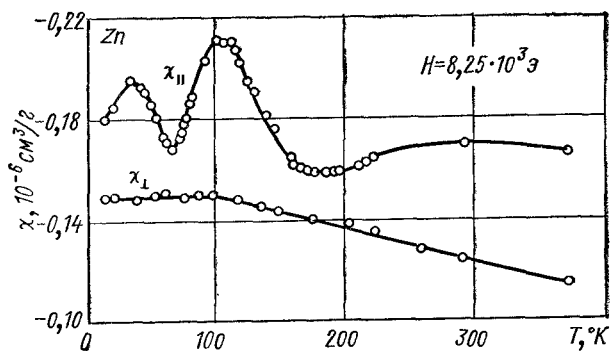


Рис. 27.10. Зависимость $\chi_{||}$ и $\chi_{\perp}$ для Zn (по отношению к гексагональной оси) от температуры [62, 103].

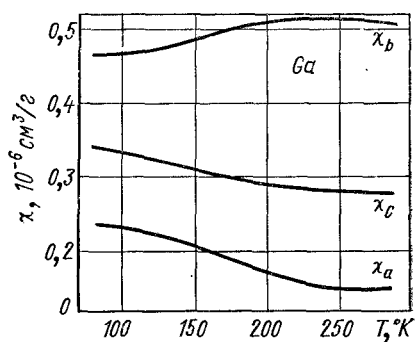


Рис. 27.11. Зависимость χ_a , χ_b , χ_c для Ga от температуры [65].

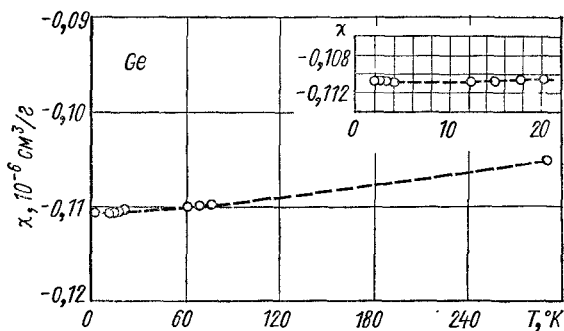


Рис. 27.12. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Ge от температуры. Удельное сопротивление 44—46 ом·см; концентрация примеси Sb $< 10^{14}$ см $^{-3}$ [69].

Вещество	T, °K	χ , 10^{-6} см ^{3} /г	Литература
Ge*	298	-0,1060	[68]
	4,2	-0,1102	[69]
	77,3	-0,1095	[69]
	293	-0,1050	[69]
Ge, $n < 5 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$	293	-0,105	[35]
$n < 10^{15}$ см $^{-3}$	293	-0,104	[70]
$n < 10^{16}$ см $^{-3}$	293	-0,105	[70]
$n = 8 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$	293	-0,105	[70]
$n = 2,9 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$	293	-0,106	[70]
$n = 6,8 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$	293	-0,110	[70]
$n = 1,5 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$	293	-0,121	[70]
$n = 10^{14}$ см $^{-3}$	1,3	-0,110	[71]
	100		
$n = 1,1 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$	1,3	-0,113	[71]
	100		
$n = 3 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$	1,3	-0,118	[71]
	100		
$n = 2 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$	1,3	-0,146	[71]
	100		
$n = 10^{19}$ см $^{-3}$	1,3	-0,180	[71]
	100		
$n = 3,2 \cdot 10^{19}$ см $^{-3}$	1,3	-0,218	[71]
	100		
Ge	293	-0,1055	[68]
	293	-0,1061	[68]
	293	-0,1066	[68]
	293	-0,1105	[68]
Ge, $n = 6,5 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$	141	$-4,7 \cdot 10^{-2}$	[68]
$n = 6,5 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$	297	$-2,82 \cdot 10^{-2}$	[68]
$n = 5,2 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$	141	$-6,71 \cdot 10^{-4}$	[68]
$n = 5,2 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$	297	$-2,54 \cdot 10^{-4}$	[68]
$p = 4 \cdot 10^{19}$ см $^{-3}$	141	$-1,2 \cdot 10^{-2}$	[72]
$p = 4 \cdot 10^{19}$ см $^{-3}$	297	$-1,06 \cdot 10^{-2}$	[72]
$p = 3,6 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$	141	$-1,3 \cdot 10^{-3}$	[72]
$p = 3,6 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$	297	$3,29 \cdot 10^{-4}$	[72]
As	90	+0,01	[73]
As (поликристалл)	298	-0,07	[73]
	84	+0,146	[74]
	181	+0,092	[74]
	298	+0,016	[74]
	364	-0,034	[74]
As (монокристалл) $\chi_{ }$	461	-0,087	[74]
	82	+1,005	[74]
	194	+0,765	[74]
	292	+0,578	[74]
	311	+0,547	[74]
	391	+0,435	[74]
As (монокристалл) $\chi_{\perp}$	531	+0,273	[74]
	82	-0,238	[74]
	180	-0,262	[74]
	292	-0,279	[74]
	433	-0,302	[74]
As (аморфный)	510	-0,302	[74]
	90	-0,30	[73]
AsCl $_3$	298	-0,31	[73]
As $_2$ O $_3$	291	-0,408 (ж.)	[6]
As $_2$ S $_3$	291	-0,27	[7]
Se (гексагональный) ^{2*}	291	-0,03	[7]
	293	-0,336	[75]

* См. рис. 27.12, 27.13, 27.14.

** См. рис. 27.15.

Вещество	$T, ^\circ\text{K}$	$\chi, 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	Литература
Se (гексагональный)	293	-0,280	[76]
Se (аморфный)	293	-0,306	[75]
	293	-0,290	[76]
	300	-0,279	[77]
	513	-0,307	[78]
	(ж.)		
	613	-0,308	[78]
	688	-0,305	[78]
Br	103	-0,40 (ТВ.)	[11]
	265	-0,40 (ТВ.)	[11]
	266	-0,40 (ж.)	[11]
	291	-0,40 (ж.)	[11]
Kr	291	-0,38 (ж.)	[79]
	—	-0,35 (г.)	[80]
Rb*	298	0,21	[8]
	303	0,198	[81]
	373	0,198	[81]
Rb ₂ CO ₃	293	-0,321	[37]
RbCl	293	-0,327	[37]
RbNO ₃	293	-0,281	[37]
Rb ₂ SO ₄	293	-0,331	[37]
Sr	273	1,02	[82]
	295	1,05	[82]
	338	1,09	[82]
	533	0,73	[82]
SrBr ₂	292	-0,39	[7]
	293	-0,53	[83]
SrBr ₂ ·6H ₂ O ^{2*}	286	-0,356	[6]
SrCO ₃	298	-0,300	[6]
Sr(CH ₃ ·COO) ₂	284	-0,385	[6]
SrCl ₂	293	-0,56	[7]
SrCl ₂ ·6H ₂ O ^{2*}	289	-0,387	[6]
SrF ₂	293	-0,296	[12]
SrI ₂	292	-0,44	[7]
	293	-0,38	[6]
Sr(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	286	-0,392	[6]
SrO	293	-0,060	[7]
SrSO ₄	296	-0,286	[6]
Sr(OH) ₂ ·8H ₂ O	282	-0,264	[6]
Y ^{3*}	292	2,1	[46]
Zr ^{4*}	293	1,38	[55]
	293	1,33	[48]
ZrC	293	-0,22	[50]
ZrN ^{5*}	293	0,57	[50]
ZrO ₂	288	-0,112	[7]
ZrSiO ₄	292	-0,215	[6]
Nb ^{6*}	293	2,34	[55]
	298	2,20	[56]
	14	2,34	[10]
	289	2,28	[10]
NbH _{0,86}	81	0,62	[84]
	291	0,70	[84]
Mo ^{7*}	293	0,82	[48]
MoBr ₂	293	1,34	[86]
MoBr ₄	293	1,62	[87]
Mo(CO) ₆	293	-0,28	[88]

* См. рис. 27.2: при уменьшении температуры от 298 до 78°K χ увеличивается на 2,5% [8].

^{2*} Измерения на растворе.

^{3*} См. рис. 27.6.

^{4*} См. рис. 27.8, 27.16.

^{5*} Магнитное поле $H=1945$ э.

^{6*} См. рис. 27.8.

^{7*} См. рис. 27.17.

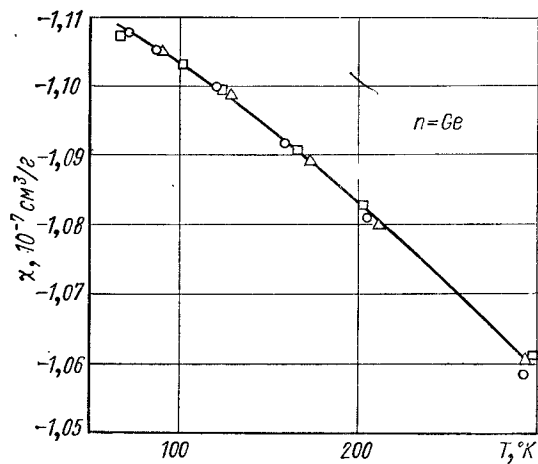


Рис. 27.13. Зависимость удельной магнитной восприимчивости n -Ge от температуры. Концентрация носителей в образцах:

○, △ — 10^{13} см^{-3} ; □ — 10^{14} см^{-3} [68, 103].

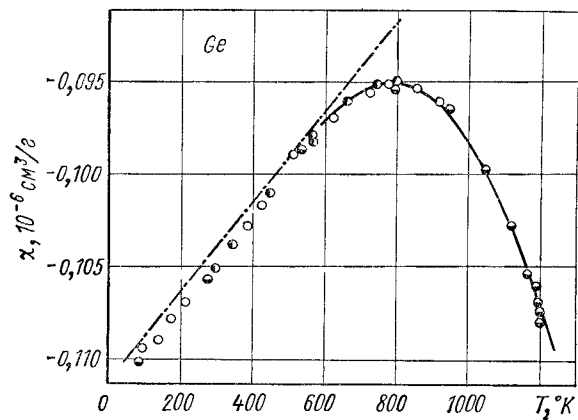


Рис. 27.14 Зависимость удельной магнитной восприимчивости Ge от температуры [35, 103].

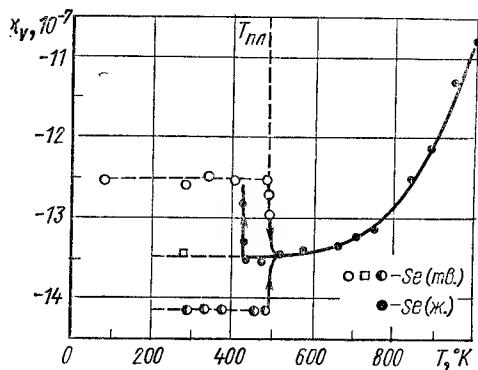


Рис. 27.15. Зависимость χ_v твердого и жидкого Se от температуры [77].

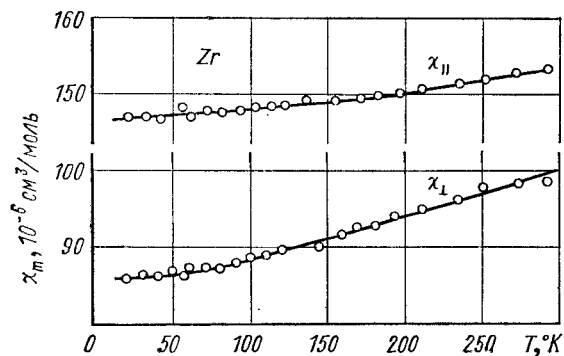


Рис. 27.16. Зависимость $\chi_{||}$ и $\chi_{\perp}$ для Zr от температуры [166] ($||$ и $\perp$ гексагональной оси; $H = 11$ кэ).

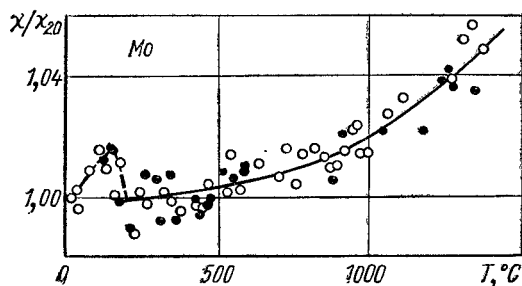
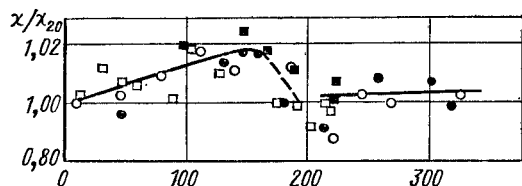


Рис. 27.17. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} Mo от температуры [48] (χ_{20} — магнитная восприимчивость при 20° C).

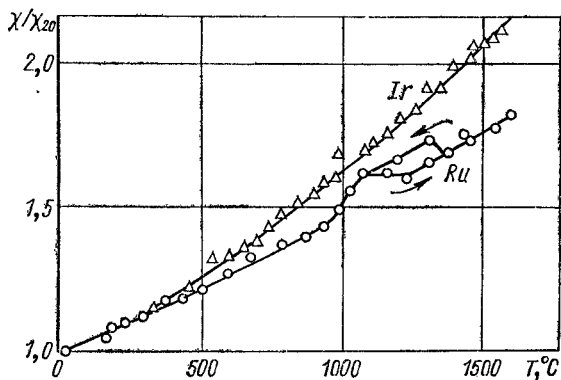


Рис. 27.18. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для Ru, Ir от температуры [6] (χ_{20} — магнитная восприимчивость при 20° C).

Вещество	$T, ^\circ K$	$\chi, 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	Литература
MoF ₆	293	—0,12	[39]
MoO ₂	293	0,33	[54]
	293	0,31	[85]
MoO ₃	293	0,88	[54]
	293	0,02	[85]
Mo ₂ O ₃	289	—0,35	[7]
Mo ₂ O ₅	293	0,23	[86]
Mo ₃ O ₈	289	0,30	[54]
MoS ₂	289	—0,33	[7]
	293	—0,84	[85]
H ₂ MoO ₄	289	—0,015	[7]
Tc	78	2,9	[89]
	298	2,7	[89]
	402	2,5	[89]
TcO ₂ ·2H ₂ O	78	3,4	[89]
	197	1,86	[89]
	256	1,63	[89]
	300	1,46	[89]
	348	1,40	[89]
	398	1,34	[89]
Ru*	18	0,43	[11]
	103	0,55	[11]
	173	0,50	[11]
	233	0,46	[11]
	293	0,34	[48]
RuCl ₃	298	7,21	[90]
	423	5,18	[90]
RuO ₂	298	1,21	[90]
	623	1,46	[90]
Rh ²⁺ *	293	1,03	[48]
	20	0,926	[91]
	40	0,928	[91]
	60	0,930	[91]
	80	0,932	[91]
	100	0,935	[91]
	200	0,960	[91]
	290	0,988	[91]
	623	1,17	[91]
Rh ₂ O ₃	298	0,408	[90]
	623	0,398	[90]
RhF ₄	293	2,99	[45]
Pd ³⁺ *	293	5,4	[48]
	20	7,32	[91]
	40	7,37	[91]
	60	7,49	[91]
	70	7,54	[91]
	80	7,56	[91]
	90	7,54	[91]
	100	7,50	[91]
	150	7,06	[91]
	200	6,44	[91]
	250	5,79	[91]
	270	5,53	[91]
	290	5,27	[91]
	291	5,8	[14]
	473	4,6	[14]
Pd	1023	2,6	[14]
	1503	1,7	[14]

* См. рис. 27.18.

2* См. рис. 27.19.

3* См. рис. 27.20.

Вещество	$T, ^\circ\text{K}$	$\chi, 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	Литература
Ag*	296	-0,181	[58]
	293	-0,192	[92, 93]
	63,8	-0,190	[94]
	289	-0,188	[94]
	14	-0,19	[16]
	293	-0,1807	[59]
	400	-0,1792	[59]
	600	-0,1769	[59]
	975	-0,1786	[59]
	291	-0,33	[7]
	299	-0,322	[6]
	295	-0,292	[6]
	290	-0,35	[7]
	292	-0,37	[7]
AgBr	299	-0,322	[6]
AgCN	295	-0,292	[6]
AgCO ₃	290	-0,35	[7]
AgCl	292	-0,37	[7]
AgI	300	-0,274	[6]
AgNO ₃	299	-0,292	[6]
AgSO ₄	14	-0,326	[99]
Cd²⁺ (поликристалл)	289	-0,183	[99]
	293	-0,175	[96]
	293	-0,175	[96]
Cd (монокристалл) $\perp$ гексагональной оси	14	-0,130	[97]
	293	-0,142	[97]
Cd $\parallel$ гексагональной оси	14	-0,679	[97]
	293	-0,243	[97]
CdBr ₂ ·4H ₂ O	288	-0,343	[6]
Cd(CH ₃ COO) ₂ ·3H ₂ O	291	-0,365	[6]
Cd(CN) ₂	290	-0,292	[6]
CdCO ₃	288	-0,305	[6]
CdCl ₂ ·H ₂ O	285	-0,368	[6]
CdI ₂	294	-0,308	[6]
Cd(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	292	-0,265	[6]
CdO	293	0,234	[98]
CdS	293	-0,346	[98]
CdSb	293	-0,213	[100]
	293	-0,30	[101]
3CdSO ₄ ·8H ₂ O	286	-0,281	[6]
In (поликристалл)^{3*}	293	-0,11	[11]
	110	-0,14	[11]
	293	-0,077	[102]
	295	-0,089	[103]
	293	-0,121	[102]
	293	-0,158	[104]
In (монокристалл) $\chi_{\parallel}$	293	-0,054	[102]
	293	-0,078	[104]
In (монокристалл) $\chi_{\perp}$	293 ^{4*}	-0,301	[35]
	291	-0,39	[7]
	293 ^{5*}	-0,320	[106]
	293 ^{6*}	-0,313	[35]
	293	-0,282	[35]
	293	-0,19	[7]
	293 ^{7*}	-0,281	[35]
	293 ^{8*}	-0,284	[105]
	293 ^{4*}	-0,301	[35]
	291	-0,39	[7]
InAs	291	-0,39	[7]
InCl ₃	293 ^{5*}	-0,320	[106]
InN	293 ^{6*}	-0,313	[35]
InP	293	-0,282	[35]
InP _{0,2} As _{0,8}	293	-0,19	[7]
InS ₃	293 ^{7*}	-0,281	[35]
InSb	293 ^{8*}	-0,284	[105]

* См. рис. 27.21; при плавлении (1233°K) χ изменяется от $-0,2 \cdot 10^{-6}$ до $-0,3 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$ [95].

^{2*} См. рис. 27.22.

^{3*} См. рис. 27.23.

^{4*} $n=7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

^{5*} Решеточная часть χ .

^{6*} $n=1,9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

^{7*} Концентрация электронов $n=6,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

^{8*} $n=4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

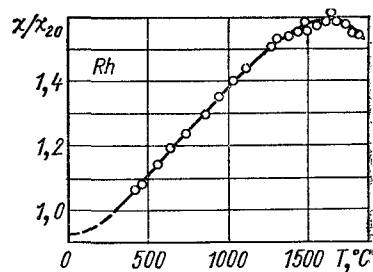


Рис. 27.19. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для Rh от температуры [48] (χ_{20} — магнитная восприимчивость при 20° C).

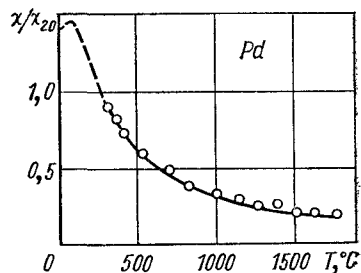


Рис. 27.20. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для Pd от температуры [48] (χ_{20} — магнитная восприимчивость при 20° C).

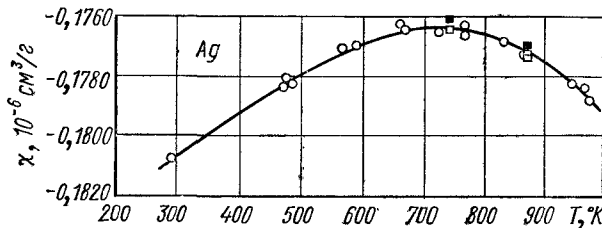


Рис. 27.21. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Ag от температуры [59]:

○ — нормальный образец; ■ — выдержка в течение 12 ч при температуре измерения; □ — обезгаженный образец.

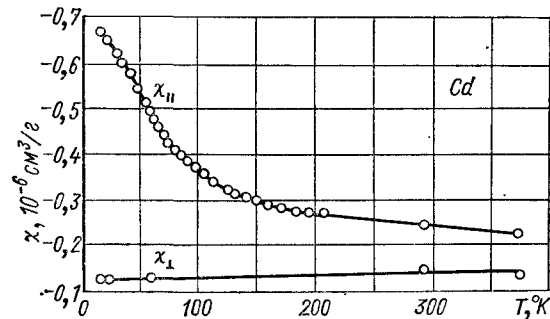
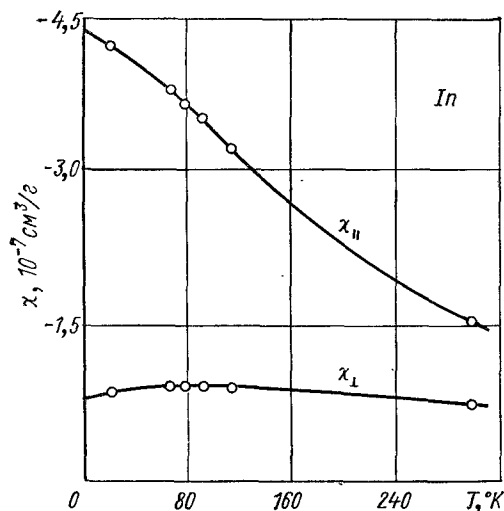
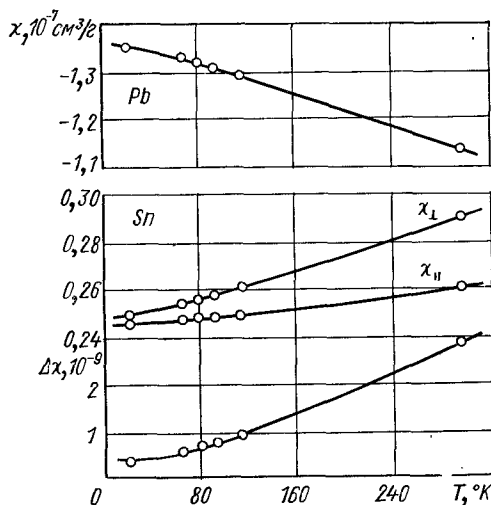
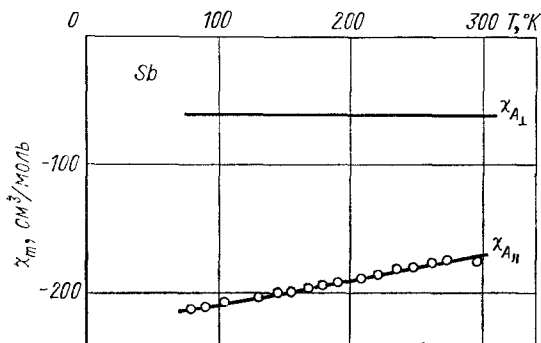


Рис. 27.22. Зависимость $\chi_{\parallel}$ и $\chi_{\perp}$ для Cd от температуры [97, 103]

Рис. 27.23. Зависимость $\chi_{||}$ и $\chi_{\perp}$ для In от температуры [104].Рис. 27.24. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Sn, Pb и $\Delta\chi = \chi_{\perp} - \chi_{||}$ для Sn от температуры [104].Рис. 27.25. Зависимость $\chi_{m||}$ и $\chi_{m\perp}$ для Sb от температуры [103, 113].

Вещество	$T, ^\circ K$	$\chi, 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{g}$	Литература
Sn-α	20	-0,20	[94]
	289	-0,25	[94]
	80	-0,26	[107]
	288	-0,31	[107]
	273*	-0,310	[108]
	2732*	-0,265	[108]
Sn-β (поликристалл) ^{3*}	4,2	+0,023	[69]
	293	+0,026	[69, 54]
Sn-β (монокристалл) $\chi_{ }$	293	+0,0241	[109]
	293	+0,026	[104]
Sn-β (монокристалл) $\chi_{\perp}$	293	+0,0270	[109]
	293	+0,029	[104]
SnBr ₄	293	-0,354	[19]
Sn(CH ₃) ₄	293	-0,218	[110—112]
Sn(C ₂ H ₅) ₄	293	-0,138	[110—112]
Sn(C ₄ H ₉) ₄	293	-0,085	[110—112]
SnCl ₂	291	-0,37	[7]
SnCl ₄	287	-0,438	[6]
SnCl ₂ ·2H ₂ O	284	-0,343	[6]
SnO	290	-0,11	[7]
SnO ₂	288	-0,050	[7]
Sn ₂ O ₃	289	-0,33	[7]
SnO(OH) ₂	293	-0,278	[12]
Sn(OH) ₄	293	-0,321	[12]
SnO(OH)(CH ₃)	293	-0,324	[12]
SnSO ₄	291	-0,29	[7]
Sb (поликристалл) ^{4*}	297	-0,80	[113]
Sb(монокристалл) $\chi_{ }$	90	-1,73	[114]
	293	-1,42	[114]
Sb (монокристалл) $\chi_{\perp}$	90	-0,50	[114]
	293	-0,50	[114]
SbBr ₃	293	-0,275	[6]
SbCd	293	-0,213	[116]
SbCl ₃	284	-0,376	[6]
SbCl ₅	288	-0,386	(ж.) [6]
SbF ₃	293	-0,255	[12]
Sb ₂ O ₃	287	-0,19	[7]
Sb ₂ Se ₃ ^{5*}	130	-0,383	[115]
Sb ₂ Te ₃	500		
	130	-0,398	[115]
SbZn	293	-0,153	[116]
	293	-0,040	(ж.) [116]
	293	-0,285	[116]
	293	-0,261	[116]
	—	-0,107	(ж.) [116]
Te (поликристалл) ^{6*}	14,2	-0,293	[94]
	289	-0,290	[94]
	293	-0,290	[76]
	300	-0,288	[77]
	293	-0,307	[116]

* $n=10^{17} \text{ cm}^{-3}$.** Решеточная часть χ .

*** См. рис. 27. 24.

**** См. рис. 27.25.

***** p-Проводимость.

**** См. рис. 27.26.

Вещество	T, °K	χ , 10^{-6} см ³ /г	Литература
Te (монокристалл)* $\chi_{\parallel}$	293	—329	[116]
Te (монокристалл) $\chi_{\perp}$	293	—0,296	[116]
	> 713	—0,029 (ж.)	[100]
TeO ₂	291	—0,14	[7]
Te(OH) ₆	293	—0,353	[6]
I	14	—0,313	[94]
	289	—0,336	[94]
	290	—0,35	[77]
	298	—0,35	[14]
	368	—0,38	[14]
	386	—0,39 (ж.)	[14]
	433	—0,33 (ж.)	[14]
ICl	285	—0,336 (ж.)	[6]
ICl ₂ ^{2*}	288	—0,387	[6]
Xe	293	—0,51	[117]
	293	—0,53	[118]
Cs ^{3*}	293	0,226	[40]
	293	0,22	[119]
Cs	298	0,23	[8]
Cs ₂ AgAuCl ₆	293	—0,33	[120]
Cs ₂ CO ₃	293	—0,320	[12, 37]
CsCl	293	—0,363	[12, 37]
CsNO ₃	293	—0,412	[12, 37]
Cs ₂ SO ₄	293	—0,322	[12, 37]
CsSO ₄ Al ₂ (SO ₄) ₃	282	—0,51	[7]
24H ₂ O·CsSO ₃ Al ₂ (SO ₄) ₃	287	—0,49	[7]
Ba	103	0,9	[11]
	291		
	293	0,147	[121]
	573	0,316	[121]
	673	0,415	[121]
Ba ₃ (AsO ₃) ₂	293	—0,280	[12]
BaBr ₂	293	—0,39	[7]
BaBr ₂ ·2H ₂ O	293	—0,371	[22]
BaCO ₃	282,5	—0,270	[6]
BaCl ₂	293	—0,41	[7]
BaCl ₂ ·2H ₂ O	284	—0,323	[6]
BaF ₂	293	—0,291	[37]
BaI ₂ ^{4*}	295	—0,39	[122]
BaI ₂ ·2H ₂ O	292	—0,38	[7]
Ba(NO ₃) ₂	293	—0,254	[12]
BaO	293	—0,13	[7]
Ba(OH) ₂	291	—0,32	[7]
Ba(OH) ₂ ·8H ₂ O	293	—0,497	[37]
BaS	291	—0,32	[7]
BaSO ₄	293	—0,306	[12]
BaS ₂ O ₆ ·2H ₂ O	293	—0,359	[12]
La ^{4*}	293	0,73	[123]
LaCl ₃	288	5,6	[7]
La(NO ₃) ₃ ·2NH ₄ NO ₃	288	—0,29	[7]
La ₂ O ₃	297	—0,40	[124]
LaS ₃	293	—0,03	[124]

* При повышении температуры $\chi_{\parallel}$ уменьшается, а $\chi_{\perp}$ почти постоянно; при 493°K $\chi_{\parallel} = \chi_{\perp}$.

^{2*} Измерения на растворе.

^{3*} При уменьшении температуры от 298°K до 78°K χ увеличивается на 12% [8].

^{4*} См. рис. 27.6.

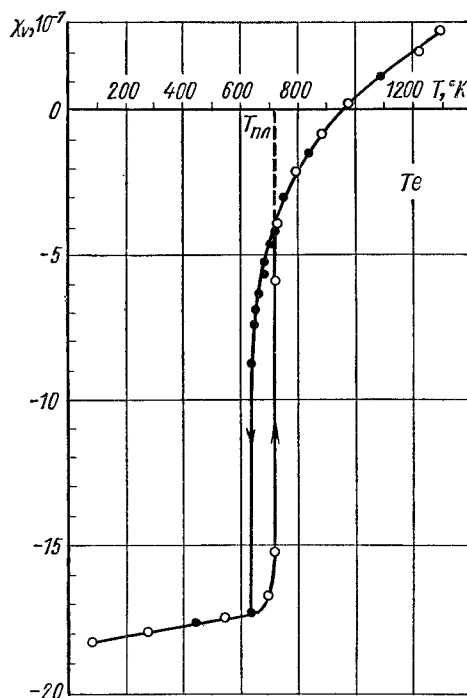


Рис. 27.26. Зависимость χ твердого и жидкого Te от температуры [77].

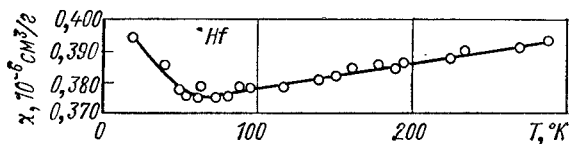


Рис. 27.27. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Hf от температуры [126].

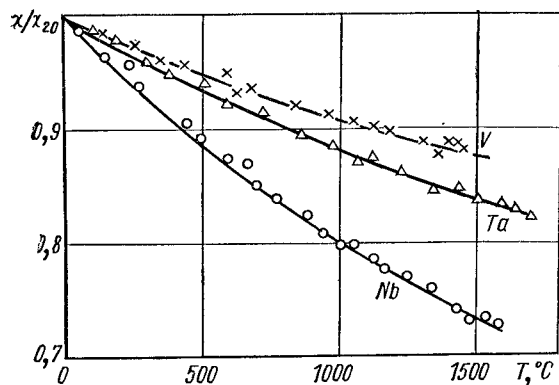


Рис. 27.28. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для V, Ta, Nb от температуры (χ_{20} — магнитная восприимчивость при 20° C) [48].

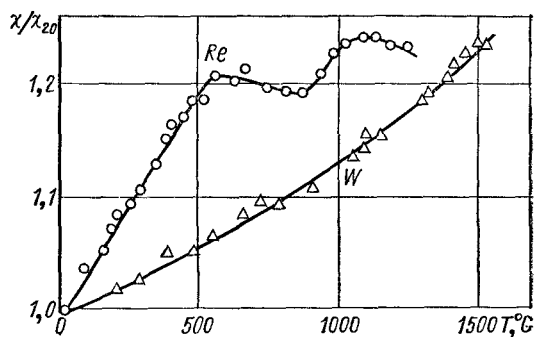


Рис. 27.29. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для Re, W от температуры (χ_{20} — магнитная восприимчивость при 20°C) [48].

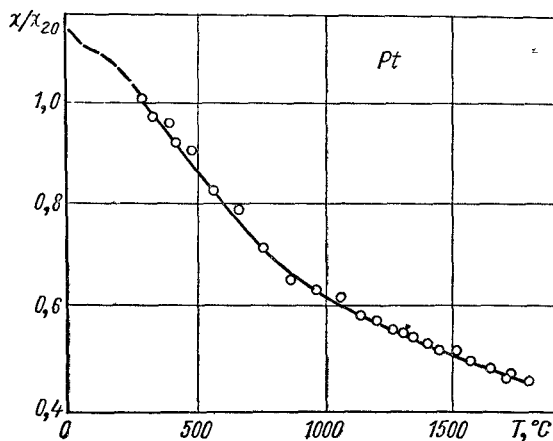


Рис. 27.30. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для Pt от температуры (χ_{20} — магнитная восприимчивость при 20°C) [48].

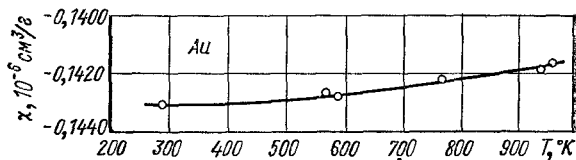


Рис. 27.31. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Au от температуры [59].

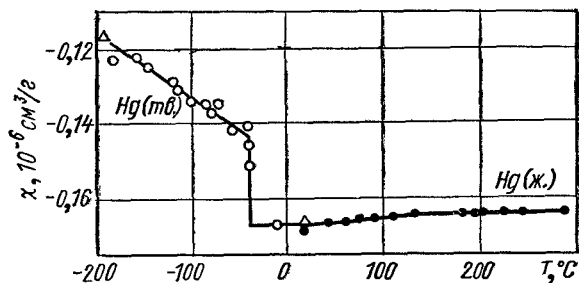


Рис. 27.32. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Hg от температуры [103].

Вещество	T, °K	$\chi, 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	Литература
LaS ₄	293	-0,26	[124]
La ₂ (SO ₄) ₃	293	-0,30	[47]
Hf*	4,2	0,46	[125]
	77	0,40	[125]
	295	0,42	[125]
	293	0,39	[126]
	293	0,38	[48]
Та (поликристалл) ^{2*}	298	0,827	[56]
	298	0,840	[127]
Та (монокристалл) $\chi_{\parallel}$	293	0,85	[48]
	303	-0,329	[103, 116]
	493	-0,296	[116]
Та (монокристалл) $\chi_{\perp}$	633	-0,296	[103, 116]
	493	-0,296	[116]
W ^{3*}	633	-0,296	[116]
	293	0,29	[48]
	293	0,291	[128]
WBr ₅	293	0,130	[129]
WBr ₆	293	0,03	[129]
WC ^{4*}	293	0,05	[50]
WF ₆	293	-0,134 (ж.)	[39]
WO ₂	293	0,11	[129]
W ₂ O ₅	293	0,20	[129]
WO ₃	288	0,81	[54]
Re ^{5*}	293	0,35	[48]
	194	0,369	[130]
	293		
ReO ₂	78	0,073	[89]
	298		
Re ₂ O ₂	293	0,2	[131]
Re ₂ O ₃	293	0,16	[131]
ReO ₄ K	293	-0,119	[130]
ReO ₄ NH ₄	293	-0,150	[130]
Os	298	0,052	[132]
Ir ^{6*}	293	0,14	[8]
	291	0,15	[14]
	473	0,17	[14]
	1123	0,26	[14]
	1423	0,31	[14]
IrCl ₃	298	-0,114	[133]
IrO ₂	298	+0,997	[133]
	623	+0,926	[133]
Pt ^{7*}	293	0,97	[48]
	20	1,094	[91]
	100	1,065	[91]
	200	1,028	[91]
	290	0,972	[91]
	298	0,982	[90]
	623	0,795	[90]
	973	0,45	[14]
	1493	0,30	[14]

1* См. рис. 27.7, 27.27.

2* См. рис. 27.28.

3* См. рис. 27.29.

4* При $H = 3630$ э $\chi = 0,07 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$ для $T = 293^\circ\text{K}$, $\chi = 0,06 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$ для $T = 513^\circ\text{K}$, $\chi = 0,02 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$ для $T = 723^\circ\text{K}$ [50].

5* См. рис. 27.29.

6* См. рис. 27.18.

7* См. рис. 27.30.

Продолжение табл.

Вещество	$T, ^\circ K$	$\chi, 10^{-6} \text{ см}^2/\text{г}$	Литература
PtCl	298	-0,51	[90]
PtCl ₂ CO	293	-0,29	[88]
PtCl ₂ ·2CO	293	-0,37	[88]
K ₂ PtCl ₆	293	-0,393	[134]
K ₂ PtCl ₄	293	-0,356	[134]
K ₂ Pt(C ₂ O ₄) ₂ ·2H ₂ O	293	-0,31	[134]
Au*	296	-0,142	[58]
	14	-0,132	[96]
	295	-0,1430	[59]
	975	-0,1417	[59]
AuBr	293	-0,22	[135]
AuCl ₃	294	-0,37	[135]
AuCl	289	-0,288	[6]
AuI	293	-0,28	[135]
AuKCl ₄	293	-0,4	[135]
Hg (поликристалл) ^{2*}	560,5	-0,1637 (ж.)	[136]
	291,5	-0,1681 (ж.)	[136]
	293	-0,167 (ж.)	[40]
	80	-0,118 (тв.)	[137]
Hg (монокристалл) $\chi_{\parallel}$	80	-0,112	[137]
Hg (монокристалл) $\chi_{\perp}$	80	-0,121	[137]
HgBr ₂	288	-0,30	[7]
Hg(CH ₃) ₂	293	-0,199	[37]
Hg(C ₂ H ₅) ₂	293	-0,158	[37]
Hg(C ₄ H ₉) ₂	293	-0,115	[37]
Hg(C ₆ H ₁₁) ₂	293	-0,103	[37]
Hg(CH ₃ COO) ₂	301	-0,317	[6]
Hg ₂ (CH ₃ COO) ₂	300	-0,276	[6]
Hg(CN) ₂	284	-0,268	[6]
HgCl	292	-0,23	[7]
HgCl ₂	298	-0,298	[6]
Hg ₂ Cl ₂	298	-0,253	[6]
HgI ₂	289	-0,295	[6]
Hg ₂ I ₂	298	-0,245	[6]
Hg(NO ₃) ₂	287	-0,231	[6]
Hg ₂ (NO ₃) ₂ ·2H ₂ O	298	-0,225	[6]
HgO	289	-0,24	[7]
HgS	289	-0,23	[7]
HgSO ₄	297	-0,218	[6]
Hg ₂ SO ₄	299	-0,247	[6]
Tl (поликристалл)	293	-0,247	[138]
	14,2	-0,258	[94]
	289	-0,215	[94]
Tl (монокристалл) ^{3*} $\chi_{\parallel}$	293	-0,412	[138]
	293	-0,420	[139]
	293	-0,150	[30]
Tl (монокристалл) $\chi_{\perp}$	293	-0,165	[138]
	293	-0,164	[139]
	293	-0,244	[30]
Pb (поликристалл)	14,2	-0,132	[94]
	289	-0,111	[94]
	289	-0,107	[138]
	291—	-0,12	[14]
	603		
	603—	-0,08 (ж.)	[14]
	873		

* См. рис. 27.31; при плавлении (1336°K) χ изменяется от -0,16·10⁻⁶ до -0,23·10⁻⁶ см²/г [96].

^{2*} См. рис. 27.32.

^{3*} См. рис. 27.4.

Продолжение табл.

Вещество	$T, ^\circ K$	$\chi, 10^{-6} \text{ см}^2/\text{г}$	Литература
Pb (монокристалл) ^{4*} $\chi_{\parallel}$	293	-0,114	[104]
PbBr ₂	293	-0,28	[7]
PbCl ₂	286	-0,264	[6]
	288	-0,32	[7]
PbF ₂	289	-0,24	[7]
PbI ₂	292	-0,33	[7]
Pb(NO ₃) ₂	293	-0,248	[43]
PbO	293	-0,19	[140]
	291	-0,13	[7]
PbO ₂	293	-0,09	[140]
Pb ₃ O ₄	291	-0,24	[7]
PbSe ^{5*}	293	-0,447	[115]
PbTe	293	-0,446	[115]
	293	-0,150 (тв.)	[141]
	293	-0,051 (ж.)	[141]
Bi (поликристалл) ^{6*}	14	-1,55	[87]
	294	-1,34	[142]
	300	-1,30	[87]
Bi (монокристалл) ^{7*} $\chi_{\parallel}$	14	-1,20	[87]
	85	-1,295	[143]
	290	-1,08	[143]
	294	-1,05	[142]
Bi (монокристалл) $\chi_{\perp}$	14	-1,77	[87]
	85	-2,04	[143]
	290	-1,49	[143]
	294	-1,48	[142]
BiBr ₃	293	-0,328	[144]
BiCl ₃	293	-0,322	[144]
BiI ₃	293	-0,49	[7]
HBiO ₃	288	-0,22	[7]
Bi(NO ₃) ₃ ·5H ₂ O	293	-0,365	[144]
Bi ₂ O ₃	293	-1,170	[22]
Bi ₂ S ₃	293	-0,385	[144]
	293	-0,342	[144]
	130—	-0,410	[115]
Bi ₂ Se ₃	600 ^{8*}		
Bi ₂ Te ₃	130—	-0,402	[115]
	600 ^{9*}		
BiTe	293	-0,493	[100]
	293	0,57	[13]
Th	90	0,66	[13]
	293	1,92	[145]
	130—	0,410	[146, 147]
Th(CO ₃) ₂	293	$\chi < 0$	[153]
Th(NH ₂)I ₃ ·4NH ₃ ^{10*}	293	$\chi < 0$	[152]
ThO ₂ ^{10*, 11*}	83;	-0,056	[148]
	298		
ThS	293	$\chi < 0$	[149]
Th ₂ S ₃	293	$\chi < 0$	[149]
Th ₇ S ₁₂	293	$\chi < 0$	[149]
ThS ₂	293	$\chi < 0$	[149]
ThSe ^{12*}	293	$\chi > 0$	[150]
Th ₂ Se ₃	293	$\chi < 0$	[151]

^{4*} См. рис. 27.24; анизотропия χ в плоскости (100) отсутствует.

^{5*} Решеточная часть χ .

^{6*} См. рис. 27.33.

^{7*} В точке плавления (544°K) $\chi_{\text{тв}} = -0,98 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{г}$, $\chi_{\text{ж}} = -0,05 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{г}$.

^{8*} ρ -Проводимость.

^{9*} p -Проводимость.

^{10*} Не введена поправка на диамагнетизм.

^{11*} Приведено значение χ , среднее для интервала температур 83—298°K.

^{12*} χ не зависит от T [150].

Вещество	$T, ^\circ\text{K}$	$\chi, 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	Литература
$\alpha\text{-U}^*$	80	1,63	[154]
	293	1,72	[154]
$\beta\text{-U}^{2*}$	288—	2,02	[154]
	1193		
$\gamma\text{-U}^{3*}$	288—	2,06	[154]
	1193		
$\text{UO}_2(\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2) \cdot \text{H}_2\text{O}$	298	$\chi < 0$	[155]
UF_6^{4*}	90	0,01	[39]
	293	0,12	[39]
$\text{U}(\text{C}_2\text{O}_4)_2$	293	6,086	[153]
UOS	290,5	10,527	[159]
UOSe	291	7,687	[163]
US	296	15,481	[149]
	293	17,031	[156]
U_2S_2	296	7,307	[149]
	293	4,545	[157]
U_3S_5	293	4,279	[157]
US_3	293	8,083	[162]
$\alpha\text{-US}_2$	290,5	10,387	[159]
$\beta\text{-US}_2$	290,5	11,490	[159]
$\gamma\text{-US}_2$	293	12,317	[160]
USe_3	293	6,554	[161]
U_3Se_5	293	3,567	[158]
$\alpha\text{-Pu}^{5*,6*}$	78—	2,35	[164]
	793		
$\beta\text{-Pu}^{6*,7*}$	78—	2,44	[164]
	793		
$\gamma\text{-Pu}^{6*,8*}$	78—	2,36	[164]
	793		
$\delta\text{-Pu}^{6*,9*}$	78—	2,31	[164]
	793		
$\epsilon\text{-Pu}^{6*}$	78—	2,36	[164]
	793		

* См. рис. 27.34.

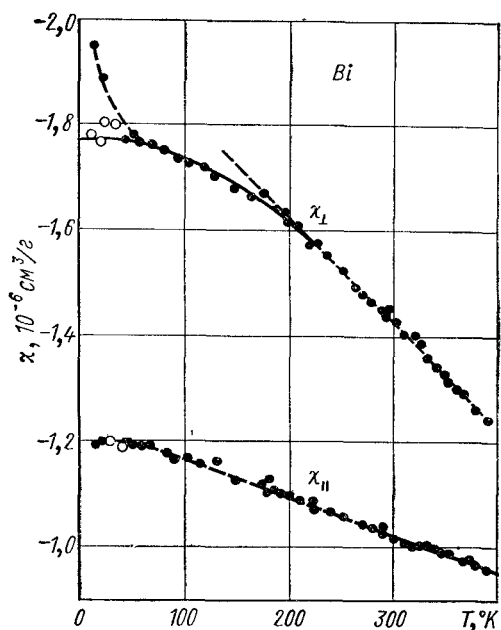
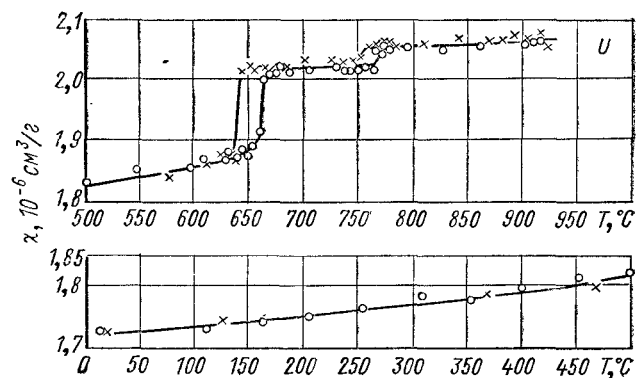
** $\alpha\text{-U}$ переходит в $\beta\text{-U}$ при $T=933^\circ\text{K}$; значение χ для $\beta\text{-U}$ — среднее для приведенного интервала температур.*** $\beta\text{-U}$ переходит в $\gamma\text{-U}$ при $T=1040^\circ\text{K}$; значение χ для $\gamma\text{-U}$ — среднее для приведенного интервала температур.**** χ не зависит от T .* См. рис. 27.35; $\alpha\text{-Pu}$ переходит в $\beta\text{-Pu}$ при $T=400^\circ\text{K}$.** Приведено среднее значение χ для интервала температур 78—793°K [164].*** $\beta\text{-Pu}$ переходит в $\gamma\text{-Pu}$ при $T=490^\circ\text{K}$.**** $\gamma\text{-Pu}$ переходит в $\delta\text{-Pu}$ при $T=590^\circ\text{K}$.***** $\delta\text{-Pu}$ переходит в $\epsilon\text{-Pu}$ при $T=740^\circ\text{K}$.Рис. 27.33. Зависимость $\chi_{||}$ и $\chi_{\perp}$ для Bi от температуры [103]:● — $H = 9,5 \text{ кэ}$; ○ — $H = 4,85 \text{ кэ}$.

Рис. 27.34. Зависимость удельной магнитной восприимчивости U от температуры [103, 154].

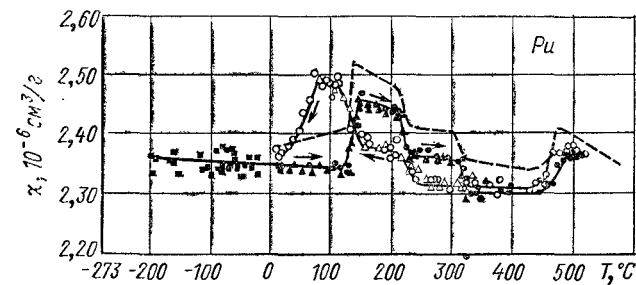


Рис. 27.35. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Pu от температуры [103, 164]:

▲, ● — измерения при нагреве; △, ○ — при охлаждении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Havens G. "Phys. Rev.", 1933, v. 43 (2), p. 992.
2. Cabrera B., Fahlenbrach H. "Ann. Soc. espan. fós. quim.", 1934, v. 32, p. 525.
3. Ishiware T. "Sci. Repts Tôhoku Univ., Ser. I", 1914, v. 3, p. 127, 303; 1915, v. 5, p. 53; 1920, v. 9, p. 233.
4. Auer H. "Ann. Phys.", 1933, Bd. 18, S. 593.
5. Cabrera B., Fahlenbrach H. "Naturforsch.", 1934, Bd. 22, S. 417.
6. Kido K. "Sci. Repts Tôhoku Univ.", 1932, v. 21, p. 149, 288, 869.
7. Meyer St. "Phys. Z.", 1925, Bd. 26, S. 51.
8. Collings E. W. "J. Phys. Chem. Solids", 1965, v. 26, p. 949.

9. Starr C., Kaufmann A. R. "Phys. Rev.", 1941, v. 59, p. 476.
10. Веркин Б. И., Дмитриенко И. М., Свечкарев И. В. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1961, т. 40, с. 670.
11. Owen M. "Ann. Phys.", 1912, Bd 37, S. 657.
12. Pascal P. "Compt. rend.", 1921, v. 173, p. 144, 712; 1922, v. 174, p. 457, 1698; 1923, v. 175, p. 1063.
13. Klemm L. "Z. Electrochem.", 1939, Bd 45, S. 354.
14. Honda K. "Ann. phys.", 1910, v. 32, p. 1027.
15. Meslin J. "Ann. de chim. et de phys.", 1906, v. 7, p. 145.
16. De Haas W., van Alphen P. M. "Proc. Koninkl. nederl. acad. wet. Amst.", 1933, v. 36, p. 263.
17. Krishnan K. S. "Phys. Rev.", 1934, v. 45, p. 115.
18. Sonè I. "Sci. Repts Tôhoku Univ., Ser. I", 1919, v. 8, p. 115; 1922, v. 11, p. 139.
19. Pascal P. "Compt. rend.", 1908, v. 147, p. 56, 242, 742; 1909, v. 148, p. 413; 1910, v. 150, p. 1167.
20. Bitter F. "Phys. Rev.", 1930, v. 35, p. 1572.
21. Wiersma E. C., de Haas W., Capel W. H. "Proc. Koninkl. nederl. acad. wet. Amst.", 1930, v. 33, p. 1119.
22. Endo H. "Sci. Repts Tôhoku Univ. Ser. I", 1925, v. 14, p. 479.
23. Elliot N. "J. Chem. Phys.", 1934, v. 2, p. 298.
24. Onnes H., Parrier A. "Proc. Roy. Acad. Sci. Amst.", 1910, v. 12, p. 799; 1911, v. 14, p. 115; 1912, v. 14, p. 674; 1914, v. 16, p. 894, 901.
25. Bauer E., Weiss P., Piccard A. "Compt. rend.", 1918, v. 167, p. 484.
26. Laine P. "Compt. rend.", 1933, v. 196, p. 910.
27. Hector L. G. "Phys. Rev.", 1924, v. 24, p. 418.
28. Venkateswarlu K., Sriraman S. "Z. Naturforsch.", 1958, Bd 13a, S. 445, 451.
29. Ishiwara T. "Sci. Repts Tôhoku Univ. Ser. I", 1914, v. 3, p. 303; 1916, v. 5, p. 53; 1920, v. 9, p. 233.
30. Веркин Б. И., Свечкарев И. В. «Укр. физ. журн.», 1962, т. 7, № 3, с. 322.
31. Thomas J. G., Mendoza E. "Philos. Mag.", 1951, v. 43, p. 900.
32. Studley J. "Phys. Rev.", 1907, v. 24, p. 22.
33. Lingelback R., Vogt E. "Acta Metall.", 1959, v. 7, p. 441.
34. Wilson J. "Proc. Roy. Soc.", 1921, v. A 98, p. 274; 1923, v. 103, p. 185.
35. Busch G., Kern R. "Helv. phys. acta", 1959, v. 32, p. 24.
36. Geist D. "Z. Physik", 1960, Bd 157, v. 430.
37. Pascal P. "Compt. rend.", 1913, v. 156, p. 323; 1914, v. 158, p. 37.
38. Bhatnagar S. S., Mathur R. M. "Philos. Mag.", 1929, v. 7 (8), p. 1041.
39. Henkel P., Klemm W. "Z. anorgan. und allgem. Chem." 1935, Bd 222, S. 70.
40. Klemm W., Hauschulz B. "Z. Elektrochem.", 1939, Bd 45, S. 346.
41. Pascal P. "Compt. rend.", 1923, v. 176, p. 1887; 1923, v. 177, p. 765; 1925, v. 180, p. 1569.
42. Lane C. T. "Phys. Rev.", 1934, v. 45 (2), p. 66.
43. Voigt N., Kinoshita S. "Ann. Physik", 1907, Bd 24, S. 492.
44. Klemm W., Jacobi H., Tilk W. "Z. anorg. Chem.", 1931, Bd 202, S. 209.
45. Nyholm R. S., Shape A. G. "J. Chem. Soc.", 1952, p. 3579.
46. Bommer H. "Z. Elektrochem.", 1939, Bd 45, S. 357.
47. Wedekind E. "Z. angew. Chem.", 1924, Bd 37, S. 87.
48. Kojima H., Tebble R. S., Williams D. E. G. "Proc. Roy. Soc., Ser. A", 1961, v. 260, p. 237.
49. Rukie J., Yao Y. L. "Proc. Phys. Soc. (London)", 1956, v. B 69, p. 417.
50. Klemm W., Schüth W. "Z. anorg. Chem.", 1931, Bd 201, S. 24.
51. Ehrlich P., Pietzka G. "Z. anorg. Chem.", 1951, Bd 275, S. 121.
52. Vaidyanathan V. I. "Nature", 1931, v. 128, p. 189.
53. Münster A., Sagel K. "Z. Physik", 1956, Bd 144, S. 139.
54. Wedekind E., Horst C. "Ber. Dtsch. chem. Ges.", 1912, Bd 45, S. 262; 1915, Bd 48, S. 105.
55. Suzuki H., Miyahara S. "J. Phys. Soc. Japan", 1965, v. 20, p. 2102.
56. Kriessman C. J. "Rev. Modern Phys.", 1953, v. 25, p. 122; "Phys. Rev.", 1954, v. 14, p. 837.
57. Whittaker A. G., Yost Don. M. "J. Amer. Chem. Soc.", 1949, v. 71, p. 3135.
58. Henry W. C., Rogers J. L. "Philos. Mag.", 1956, v. 1, p. 223.
59. Garber M., Henry W. G., Hoeve H. G. "Canad. J. Phys.", 1960, v. 38, p. 1595.
60. Khanna M. L. "J. Scient. and Industr. Res. (India)", 1947, v. 6B, p. 4.
61. Klemm W., Schüth W. "Z. anorg. Chem.", 1931, Bd 203, S. 104.
62. Marcus J. A. "Phys. Rev.", 1949, v. 76, p. 413, 621.
63. Hüttig G., Toischer K. "Z. anorgan. und allgem. Chem." 1932, Bd 207, S. 273.
64. Hüttig G. F., Toischer K. "Z. anorg. Chem.", 1932, Bd 207, S. 273.
65. Marchand A. "Compt. rend.", 1955, v. 241, p. 468.
66. Pankey T. "J. Appl. Phys.", 1960, v. 31, p. 1802.
67. Klemm W., Tilk W. "Z. anorg. Chem.", 1932, Bd 207, S. 175.
68. Stevens D. K. e. a. "Phys. Rev.", 1955, v. 100, p. 1084.
69. Van Itterbeck A., Duchateau W. "Physica", 1956, v. 22, p. 649; 1957, v. 23, p. 169.
70. Hedgcock F. T. "J. Electronics", 1957, v. 2, p. 513.
71. Bowes R. "Phys. Rev.", 1957, v. 108, p. 683.
72. Geist D. "Z. Physik", 1960 Bd 157, S. 430.
73. Stöhr H. "Z. anorgan. und allgem. Chem.", 1938, Bd 242, S. 138.
74. Bennett S. L., Heyding R. D. "J. Phys. Chem. Solids", 1966, v. 27, p. 471.
75. Prasad M., Dharmafli S. S. "Indian J. Phys.", 1937, v. 11, p. 2.
76. Busch G., Vogt O. "Helv. phys. acta", 1957, v. 30, p. 224.
77. Busch G., Risi M., Yuan S. "Helv. phys. acta", 1960, v. 33, p. 1002.
78. Curie P. "Ann. chim. et phys.", 1895 (7), v. 5, p. 325.
79. Honda K., Ishiwara T. "Sci. Repts Tôhoku Univ.", 1915, v. 4, p. 215.
80. Abonenc L. "Compt. rend.", 1939, v. 208, p. 986.
81. Venkateswarly K., Sriraman S. "J. Scient. and Industr. Res. (India)", 1955, v. 14, p. 611.
82. Rao S. R., Savithri K. "Proc. Indian Acad. Sci.", 1941, v. 14A, p. 584.
83. Ikemeyer K. "Ann. Phys.", 1929, v. 1, p. 169.
84. Trzebiatowski W., Stalinski B. "Bull. Acad. polon. sci., Cl.", 1953, v. 111, p. 317.
85. Tjabbes B. Ph. "Proc. Koninkl. nederl. acad. wet. Amst.", 1932, v. 35, p. 693.
86. Fendins H. Dissert., Hannover, 1931.
87. Shoenberg D., Uddin M. Z. "Proc. Roy. Soc.", 1936, v. A 156, p. 687.
88. Klemm W., Jacobi H., Tilk W. "Z. anorg. Chem.", 1931, Bd 210, S. 1.
89. Nelson C. M., Boyd E. E., Smith Wm. T. "J. Amer. Chem. Soc.", 1954, v. 76, p. 348.

90. Goutrie A. N., Bourland L. T. "Phys. Rev.", 1931, v. 37, p. 303.
91. Moore F. E., Mattnews J. C. "Proc. Roy. Soc.", 1952, v. A 212, p. 137.
92. Scott A. B., Cromwell T. M. "J. Amer. Chem. Soc.", 1948, v. 70, p. 3981.
93. Vogt E., Friedewold H. "Ann. Phys.", 1956, Bd 17, S. 281.
94. De Haas W. J., van Alphen P. M. "Acad. Sci. (Amsterdam)", 1933, v. 36, p. 158.
95. Shimizu Y. "Sci. Repts Tôhoku Univ.", 1932, v. 21, p. 826; 1936, v. 25, p. 921.
96. Rao S. R., Sriraman S. "Proc. Indian. Acad. Sci.", 1937, v. 5 A, p. 343.
97. Marcus J. A. "Phys. Rev.", 1949, v. 76, p. 413, 621.
98. Prasad M. e. a. "Proc. Indian. Acad. Sci.", 1950, v. 31 A, p. 289.
99. De Haas W., Gorter U. C. I. "Proc. Koninkl. nederl. acad. wet. Amst.", 1931, v. 34, p. 317.
100. Endô H. "Sci. Repts Tôhoku Univ.", 1927, v. 16, p. 201.
101. Pilaf J. M. "Физика металлов и металловедение", 1957, т. 4, с. 232.
102. Verhaeghe H., Vandermeerssche G., le Conepte C. "Phys. Rev.", 1959, v. 80, p. 758.
103. Landolt-Börnstein. Zahlenwerte und Funktionen. II Bd, 9 teil, 1962.
104. Александров Б. Н., Веркин Б. И., Свечкарев И. В. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1960, т. 39, с. 37.
105. Stevens D. K., Crawford J. H. "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 487.
106. Yuza R., Hahn H. "Z. anorgan. und allgem. Chem.", 1940, Bd 244, S. 111, 113.
107. Busch G., Moser E. "Z. phys. Chem.", 1951, Bd 198, S. 23.
108. Busch G., Kern R. "Helv. phys. acta", 1959, v. 32, p. 24.
109. Hoge J. H. "Phys. Rev.", 1935, v. 48, p. 615.
110. Pascal P. "Compt. rend.", 1911, v. 152, p. 862, 1010.
111. Pascal P. "Bull. Soc. chim. France", 1910, v. 9, p. 6, 79, 134, 177, 336; 1911, v. 10, p. 809, 868; 1912, v. 11, p. 159, 201, 636.
112. Pascal P. "Ann. de chim. et de phys.", 1912, v. 25, p. 289.
113. Browne S. H., Lane C. T. "Phys. Rev.", 1941, v. 60, p. 895, 899.
114. Broniewski W., Franczek S., Witkowski R. "Ann. Phys.", 1938, v. 10, p. 5.
115. Matyás M. "Czechoslov. J. Phys.", 1958, v. 8, p. 301.
116. Endô H. "Sci. Repts Tôhoku Univ.", 1927, v. 16, p. 201.
- 116a. Rao S. R., Govindarajan S. R. "Proc. Indian. Acad. Sci.", 1939/40, v. A 10, p. 235, 239.
117. Mann K. E. "Z. Physik", 1936, Bd 98, S. 548.
118. Abonnenc L. "Compt. rend.", 1939, v. 208, p. 986.
119. Lane C. T. "Philos. Mag.", 1929, v. 8, p. 354.
120. Elliot N. "J. Chem. Phys.", 1934, v. 2, p. 419.
121. Lane C. T. "Phys. Rev.", 1933, v. 44, p. 43.
122. König H. "Ann. Phys.", 1887, Bd 31, S. 273.
123. Lock J. M. "Proc. Phys. Soc. (London)", 1957, v. B 70, p. 476, 566.
124. Klemm W., Meisel R., Uv. Vogel H. "Z. anorg. Chem.", 1930, Bd 190, S. 143.
125. Kreissman C. Y., McCuire T. R. "Phys. Rev.", 1955, v. 98, p. 936.
126. Волкенштейн Н. В., Галошина Э. В. «Физика металлов и металловедение», 1964, т. 18, с. 784.
127. Asmussen R. W., Soling H. "Acta chem. scand.", 1954, v. 8, p. 563.
128. Asmussen R. W., Potts-Jensen J. "Acta chem. scand.", 1957, v. 11, p. 1271.
129. Fendins H. Dissert., Hannover, 1931.
130. Perakis N., Capatos L. "Compt. rend.", 1934, v. 198, p. 1905; 1933, v. 196, p. 611.
131. Biltz W. "Z. anorg. Chem.", 1930, Bd 214, S. 227.
132. Guthrie A. N., Bourland L. T. "Phys. Rev.", 1931, v. 37, p. 303.
133. Goutrie A. N., Bourland L. T. "Phys. Rev.", 1931, v. 37, p. 303.
134. Feyts. "Compt. rend.", 1911, v. 152, p. 708; 1911; v. 153, p. 668; 1913, v. 156, p. 886.
135. Klemm W., Tilk U. W. "Z. anorg. Chem.", 1932, Bd 207, S. 175.
136. Bates L. F., Baker C. I. W. "Proc. Phys. Soc. (London)", 1938, v. 50, p. 409.
137. Vogt E. "Ann. Phys.", (5), 1932, Bd 14, S. 1.
138. Rao S. R., Subramanian K. C. "Philos. Mag.", 1936, v. 21, p. 609.
139. Rao S. R., Narayanaswamy A. S. "Philos. Mag.", 1938, v. 26, p. 1018.
140. Pascal P., Mine P. "Compt. rend.", 1931, v. 193, p. 1303.
141. Endô H. "Sci. Repts Tôhoku Univ.", 1927, v. 16, p. 201.
142. Goetz A., Focke A. B. "Phys. Rev.", 1934, v. 45, p. 170.
143. Kapitza P. "Proc. Roy. Soc.", 1931, v. A 131, p. 243.
144. Gnesotto, Binghinotto. "Atti. Ist. veneto sci. Torino", 1910, v. 69, p. 1343; 1915, v. 72, p. 1515; 1914, v. 74, p. 25; 1915, v. 75, p. 333.
145. McKay H. A. C., Nairn J. S., Waldron M. B. Proc. of the Second United Nations Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy. V. 28. 1958, p. 299.
146. Smith J. F., Greiner J. D. "Phys. Rev.", 1959, v. 115, p. 884.
147. Waff G. W., Sowards D. M., Malhotra S. C. "J. Amer. Chem. Soc.", 1958, v. 79, p. 4908.
148. Trzebiatowski W., Selwood P. W. "J. Amer. Chem. Soc.", 1950, v. 72, p. 4505.
149. Eastman E. D. e. a. "J. Amer. Chem. Soc.", 1950, v. 72, p. 4019.
150. Dawson J. K. "J. Chem. Soc.", 1951, v. 28, p. 89.
151. Dawson J. K. "Nucleonics", 1952, v. 10, N 9, p. 39.
152. Waff G. W., Sowards D. M., Malhotra S. C. "J. Amer. Chem. Soc.", 1958, v. 79, p. 4908.
153. Bose D. M., Bhar H. G. "Z. Physik", 1928, Bd 48, S. 716.
154. Bates L. F., Hughes D. "Proc. Phys. Soc. (London)", 1954, v. B 67, p. 28.
155. Comyns A. E., Gatehouse B. M., Wait E. "J. Chem. Soc.", 1958, v. 46, p. 55.
156. Picon M., Flahaut J. "Compt. rend.", 1955, v. 241, p. 655.
157. Picon M., Flahaut J. "Compt. rend.", 1955, v. 240, p. 784.
158. Khodadad P. "Compt. rend.", 1958, v. 247, p. 1205.
159. Picon M., Flahaut J. "Compt. rend.", 1953, v. 237, p. 1160.
160. Picon M., Flahaut J. "Bull. Soc. chim. France", 1958, v. 772.
161. Khodadad P., Flahaut J. "Compt. rend.", 1957, v. 244, p. 462.
162. Picon M., Flahaut J. "Compt. rend.", 1957, v. 244, p. 1777.
163. Khodadad P. "Compt. rend.", 1957, v. 245, p. 2286.
164. Seguin M. e. a. "Compt. rend.", 1958, v. 246, p. 3243.
165. Böhm B., Klemm W. "Z. anorgan. und allgem. Chem.", 1939, Bd 243, S. 69.
166. Волкенштейн Н. В., Галошина Э. В., Щеголихина Н. И. «Физика металлов и металловедение», 1968, т. 25, с. 180.

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

28.1. ВВЕДЕНИЕ

Ферромагнетиками называют вещества, магнитная проницаемость μ которых зависит от напряженности магнитного поля [1]. Магнитная индукция $B(H)$ ферромагнетиков при первом намагничивании изменяется по так называемой нулевой кривой или кривой намагничивания (кривая OA рис. 28.1); при циклическом изменении поля процесс протекает по одному из двух S-образных отрезков, которые ограничивают некоторую площадь и образуют петлю гистерезиса (см. рис. 28.1).

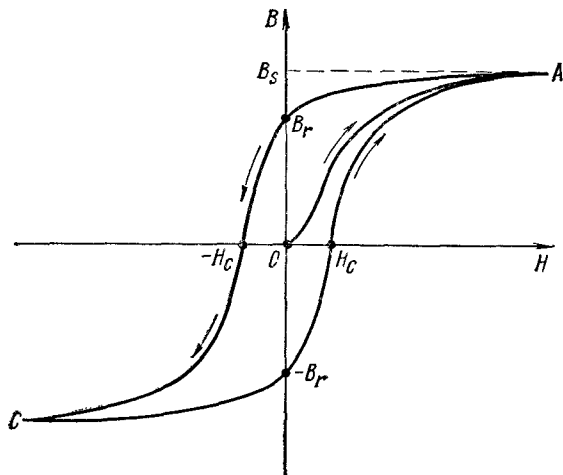


Рис. 28.1. Схематическое изображение петли гистерезиса.

Намагниченность насыщения $J_s = (B - \mu_0 H)_s / 4\pi$ — предельное значение намагниченности J при возрастании H . (Здесь μ_0 — абсолютная магнитная проницаемость вакуума, или индукционная постоянная.)

Остаточная индукция B_r (точка пересечения петли гистерезиса с ординатой) есть умноженная на 4π остаточная намагниченность при $H = 0$.

Козрцитивная сила H_c (точка пересечения петли гистерезиса с абсциссой) есть напряженность магнитного поля, необходимая для устранения остаточной индукции. Вместо индукции и намагниченности в технике легко намагничиваемые (магнитомягкие) материалы характеризуются магнитной проницаемостью μ .

Вводятся следующие величины, характеризующие магнитную проницаемость: дифференциальная $\mu_d = \frac{1}{\mu_0} \times \frac{dB}{dH}$; начальная $\mu_a = \mu_d (H = 0)$; максимальная $\mu_{\max} = \max \mu_d$; наложенная μ_Δ — средний наклон петли гистерезиса, смещенной при постоянном намагничивании, в случае намагничивания переменным током; обратимая μ_r — предельное значение μ_Δ для малых напряженностей поля; полная μ_c — отношение значения индукции B к соответствующему значению напряженности магнитного поля H в данной точке кривой намагничивания:

$$\mu_c = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B}{H}.$$

Намагниченность насыщения, как и остаточная индукция и коэрцитивная сила, уменьшается с повышением температуры и приближается к нулю вблизи ферромагнитной точки Кюри Θ_f .

В случае ферромагнетиков эффективное магнитное поле $H_{\text{эф}}$, действующее на диполи, состоит из приложенного поля H плюс внутреннее поле, которое пропорционально намагниченности J («молекулярное поле» Вейсса):

$$H_{\text{эф}} = H + \gamma J.$$

Намагниченность определяется уравнением $J = N \tilde{\mu} L \left[\tilde{\mu} (H + \gamma J) / kT \right]$, где N — число атомов в единице объема; $\tilde{\mu}$ — дипольный момент атома; $L(x) = \coth x - 1/x$ — функция Ланжевена.

Неисчезающее решение для J при $H = 0$ существует, когда $T \leq \Theta_f$, где $\Theta_f = N \tilde{\mu}^2 \gamma / 3k$ — ферромагнитная точка Кюри.

Для $T > \Theta_f$ восприимчивость определяется законом Кюри—Вейсса:

$$\chi = \frac{N \tilde{\mu}^2}{3k (T - \Theta_f)} = \frac{C}{T - \Theta_f}.$$

При $T \gg \Theta_f$ он записывается в виде

$$\chi = C / (T - \Theta_p),$$

где Θ_p , называемая парамагнитной точкой Кюри, немного больше, чем Θ_f .

Восприимчивость многих твердых тел подчиняется закону Кюри—Вейсса.

28.2. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Намагниченность насыщения и точка Кюри

Намагниченность единицы массы вещества называется удельной намагниченностью σ . Удельную намагниченность насыщения σ_s можно экстраполировать к 0°K и из значения σ_0 по формуле

$$n_B = \frac{\sigma_0 M_0}{5585} (\mu_B)$$

(M_0 — молекулярная масса) определить число магнетонов Бора на молекулу n_B .

Таблица 28.1

Намагниченность насыщения и точка Кюри (θ_f)
ферромагнитных элементов [2, 4]

Z	Элемент	20°C			$\frac{\sigma_0}{\varepsilon}$	n_B	$\theta_f, ^\circ\text{C}$
		$\sigma_s, \frac{\text{гс}\cdot\text{см}^3}{\text{г}}$	$J_s, \text{гс}$	$4\pi J_s, \text{гс}$			
26	Fe	218,0	1714	21580	221,9*	2,219*	770
27	Co	161	1422	17900	162,5	1,715	1331
28	Ni	54,39	484,1	6084	57,5*	0,604*	358
64	Gd	0	0	0	253,5	7,55	20
65	Tb	0	0	0	173,5	9,24	-50
						9,10	-50
66	Dy	0	0	0	235	10,20	-186
67	Ho	0	0	0	290	10,34	-253
68	Er	0	0	0	—	8,0	-253
69	Tm	0	0	0	—	7,0	-235

* Согласно данным работы [3], для Fe $\sigma_0 = 221,71 \pm 0,08 \text{ гс}\cdot\text{см}^3/\text{г}$, $n_B = 2,216 \pm 0,0008$, а для Ni $\sigma_0 = 58,57 \pm 0,03 \text{ гс}\cdot\text{см}^3/\text{г}$, $n_B = 0,6155 \pm 0,0003$.

Таблица 28.2

Относительная самопроизвольная удельная
намагниченность σ_s/σ_0 Fe, Co, Ni как функция
относительной температуры T/θ_f [2]

T/θ_f	σ_s/σ_0		T/θ_f	σ_s/σ_0	
	Fe	Co, Ni		Fe	Co, Ni
0	1	1	0,70	0,85	0,83
0,1	0,996	0,996*	0,80	0,77	0,73
0,2	0,99	0,99	0,85	0,70	0,66
0,3	0,975	0,98	0,90	0,61	0,56
0,4	0,95	0,96	0,95	0,46	0,40
0,50	0,93	0,94	1,0	0	0
0,60	0,90	0,90			

* Только для никеля.

Таблица 28.3

Удельная намагниченность насыщения σ_s и точка
Кюри бинарных сплавов железа [2]

Добавка	Атомное содержание, %	$\sigma_s, \frac{\text{гс}\cdot\text{см}^3}{\text{г}}$ (20°C)	n_B (на атом)	$\theta_f, ^\circ\text{C}$
Al	7,1	207	2,05	756
	19,7	184	1,74	664
	24,9	134	1,29	441
	26,0	149	1,40	494
Au	6,2	174	2,08	767
	10,5	154	2,02	768
Co	20	236	2,42	950
	33	238	2,52	970
	50	233	2,42	980
	75	203	2,14	870
	80	184	1,94	910
Cr	17,7	196	1,70	678
	47,5	90	0,98	483
	67,8	35	0,53	268
Ir	4,0	200	2,25	750
	15,0	120	1,67	—
Ni	10	217	2,26	750
	20	209	2,22	720
	40	152	1,82	330
	60	136	1,45	560
	80	98	1,04	560
Os	8,1	158	1,97	—
	12,5	50	0,69	—
Pd	5,5	203	2,19	754
	40,0	129	1,89	—
	74,8	45	0,97	~250
Pt	8,1	191	2,36	—
	12,4	177	2,43	—
	24,8	104	2,23	164
	50,0	32	0,75	—
Rh	10,0	209	2,32	—
	25,0	192	2,39	714
	40	161	2,26	624
Ru	7,0	200	2,18	660
	12,5	105	1,17	—
Sn	2,3	208	2,18	768
	6,0	197	2,16	768
Si	8,3	204	2,00	720
	15,9	174	1,67	653
	23,5	141	1,32	587
V	5,9	204	2,09	815
	10,6	184	1,91	805
	18,6	149	1,58	783

Таблица 28.4

Удельная намагниченность насыщения и точка Кюри
бинарных сплавов кобальта [2]

Добавка	Атомное содержа- ние, %	$\sigma_s, \frac{2\pi \cdot \text{см}^3}{\text{г}}$ (20°C)	μ_B (на атом)	$\theta_f, ^\circ\text{C}$
Cr	5,6	134	1,42	—
	10,6	100	1,07	—
	16,7	59,5	0,64	—
	22,1	19	0,24	—
Mn	4,2	144	1,53	—
	11,9	109	1,16	—
	17,3	84	0,89	—
	22,5	48	0,57	—
Ni	40	124	1,33	900
	70	90	0,97	680

Таблица 28.5

Удельная намагниченность насыщения и точка Кюри
бинарных сплавов никеля [2] (см. также рис. 28.2 и
28.3[6])

Добавка	Атомное содержа- ние, %	$\sigma_s, \frac{2\pi \cdot \text{см}^3}{\text{г}}$ (20°C)	μ_B (на атом)	$\theta_f, ^\circ\text{C}$
Al	2,0	47,1	0,54	293
Au	3,4	46,0	0,58	321
Cr	1,7	49,8 (—123°C)	0,53	298
	6,7	25,4 (—123°C)	0,30	72
Mo	1,9	42,3	0,51	266
	4,2	23,1	0,37	120
Mn	25	90	1,02	470
Pd	(упоряд.)	—	0,60	330
	12,1	—	0,57	217
	45,2	—	—	—116
Pt	91,3	—	—	—
	9,1	37,7	0,55	245
	25,0	16,4	0,44	86
	45,0	—	0,25	—71
Sb	7,5	12,6	0,24	23
Si	3,7	40,3	0,48	234
	6,8	23,7	0,36	117
	8,8	—	0,28	19
Sn	2,7	40,1	0,49	234
	9,0	9,9	0,30	225
Ta	3,6	—	0,41	—
	6,3	—	0,28	—
Ti	4,8	34,5	0,43	207
	10,3	—	0,22	30
W	2,1	39,2	0,49	270
	3,9	19,9	0,34	150
Y	5,5	15,3	0,29	67
Zn	4,1	45,3	0,52	300
	10,8	25,4	0,37	157

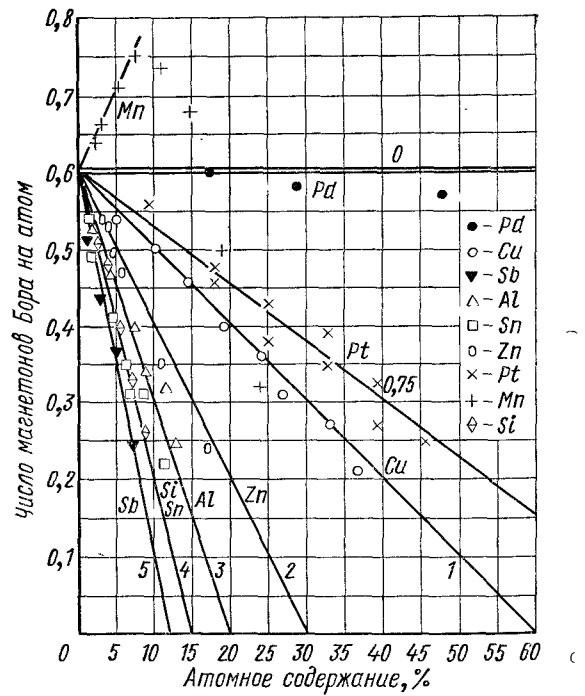


Рис. 28.2. Изменение магнитного насыщения Ni с увеличением концентрации неферромагнитного компонента при различном числе электронов на внешних оболочках второго элемента (1, 2, 3, 4, 5) [6].

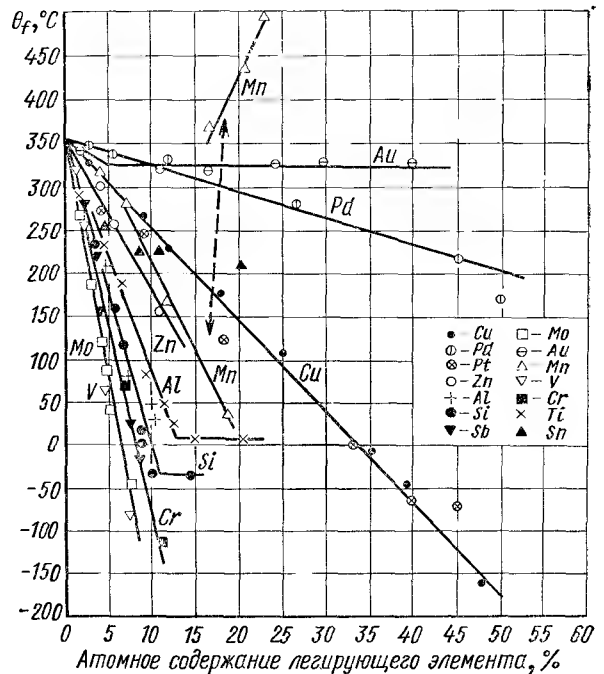


Рис. 28.3. Зависимость точки Кюри от состава никелевых сплавов [6].

Таблица 28.6

Намагниченность насыщения и точка Кюри
некоторых бинарных соединений

Вещество	$4\pi J_s, \text{ эс}$ (20°C)	n_B (на молекулу)	$\theta_f, ^\circ\text{C}$	Лите- ратура
Co_2B	—	—	510	[2]
Co_5Nd	—	10,4	—	[5]
Co_2P	—	—	920	[2]
Co_5Pr	—	10,4	—	[5]
CoPt	7200—0	—	< 600	[2]
CoS_2	—	0,84	—163	[2]
Co_5Se	—	6,6	—	[5]
Co_5Sm	—	7,7	—	[5]
Co_5Y	—	7,8	—	[5]
CoZn	—	—	195	[2]
Co_4Zn	—	—	490	[2]
CrO_2	—	2,1	—	[2]
CrS	—	—	30	[2]
CrTe	3100	2,4; 2,5	66	[2]
$\text{EuH}_{1,86}$	—	6,0	—249	[2]
EuO	—	7	—176	[2]
Fe_3Al	11 000	5,2	500	[2]
Fe_3B	15 100	5,7	739	[2]
FeBe_2	—	—	520	[2]
FeBe_5	—	—	0	[2]
Fe_3C	12 400	5,3	213	[2]
Fe_3Ce	—	—	116	[2]
FeCo	24 000	4,8	970	[2]
Fe_4N	17 500	8,9	490	[2]
FeNi_3	12 200	5,0	600	[2]
Fe_3P	—	—	420	[2]
FeS	—	—	320	[6]
FeS_2	—	—	> 0	[6]
Fe_3S_8	780	2,0	300	[2]
Fe_3Si_2	—	—	90	[6]
Fe_3Si	—	4,8	530	[2]
Fe_2U	—	1,02	—101	[7]
GdCo_2	6500	5,7	180	[2]
GdCo_5	5500	0,85	815	[2]
GdFe_2	5000	3,4	530	[2]
GdFe_5	5600	4,9	210	[2]
GdMn_2	2700	2,8	30	[2]
MnAs	8400	3,4	45	[2]
MnAu_4	—	4,15	90	[8]
MnB	1850	—	260	[2]
MnBi	7800	3,5	360	[2]
Mn_4N	2300	0,97	470	[2]
MnP	—	1,2	25	[2]
MnPt_3	5000	—	—	[2]
Mn_2Sb	2900	1,9	277	[2]
MnSb	8900	3,5	314	[2]
Mn_4Sn	1250	—	150	[2]
Mn_2Sn	—	2,7	—10	[2]
Ni_2Mg	—	—	235	[2]
NiMn	9000	4,1	460	[2]

Таблица 28.7

Зависимость намагниченности J железа от
температуры T и напряженности магнитного поля
 H [9, 10]

$T, ^\circ\text{C}$	$H, \text{ э}$	$J, \text{ эс}$	$T, ^\circ\text{C}$	$H, \text{ э}$	$J, \text{ эс}$
—273	4 350	1730,1	734	8200	752,8
	8 020	1735,2		9160	755,5
	11 980	1735,0			
	19 900	1735,6			
—173	4 350	1726,4	744,5	1307	611
	8 020	1731,5		3115	632
	11 980	1731,3		4480	642,5
	19 900	1732,2		5340	649
—73	4 350	1714,7		5920	652,5
	8 020	1719,8		6810	658
	11 980	1719,8		7410	661,5
	19 900	1714,7		8510	667
+7	4 350	1700,2	747	1457	577
	8 020	1705,5		3265	599,5
	11 980	1705,5		4630	612
	19 900	1705,8		5490	619
+15	4 350	1698,6		6070	623,2
	8 020	1703,7		6970	630
	11 980	1704,0		7570	633,5
	19 900	1704,1		8670	639,5
523,5 620,5 663	2860—6500	1390	756	996	396,8
	3010—7250	1210		2087	425,5
	3470—7710	1100		3855	457,0
				5180	478,4
716	307	853		6020	489
	2125	871,4		6590	496
	3510	878		7490	505,5
	4390	881,2		8070	511,8
	4980	884,8		9160	521,2
	5490	886,8		10 100	529,0
	5895	887,8			
	6490	890,6			
	7610	892,8	759	470	206
	8570	896		1459	288,4
				2463	337,7
				4169	384
730	702	757,5		5465	412
	2525	773,8		6300	425
	3900	783,3		6867	433
	4750	787,8		7365	438,5
	5350	790,0		7755	443,0
	5870	792,2		8330	451,5
	6260	793,5		9412	463,0
	6850	796		10 349	471,0
	7970	799	764,5	450	62,8
	8930	802		860	114,2
				1850	190,3
				2840	243,1
734	897	712		4480	299,8
	2735	726		5720	331,0
	4110	735		6550	348
	4980	740,4		7150	359
	5570	743,0		8000	375
	6080	745,5		8580	384
	6480	747		9600	399,5
	7080	749		10 550	410

Намагниченность ферромагнетиков как функция
напряженности магнитного поля и температуры
(табл. 28.7 и 28.8; рис. 28.4—28.16)

Продолжение табл. 28.7

$T, ^\circ\text{C}$	$H, \text{э}$	$J, \text{зс}$	$T, ^\circ\text{C}$	$H, \text{э}$	$J, \text{зс}$
773	1140	46,7	794	6 800	76,6
	2280	89,8		8 300	94,8
	3300	125,3		9 700	109,5
	5000	172,2		11 600	129,0
	6230	206,0	811	9 900	61,2
	7100	226		11 900	75,6
	7600	237			
	8500	256,7			
	9050	266,5	817	9 980	52,8
	10 100	282,7		12 050	62,7
	11 000	295,2			
781	3 570	73,6	822,5	10 000	48,1
	5 300	109		12 100	56,3
	6 600	134			
	7 450	149,5			
	8 000	158,4	826	10 000	45,4
	8 850	174		12 100	54,2
	9 400	183			
	10 420	198			
	11 400	210			

Таблица 28.8

Зависимость удельной намагниченности σ никеля от напряженности поля и температуры [12]

$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \frac{\text{зс}\cdot\text{см}^3}{\text{э}}$			$\sigma_s, \frac{\text{зс}\cdot\text{см}^3}{\text{э}}$
	$H=8000 \text{ э}$	$H=12000 \text{ э}$	$H=18000 \text{ э}$	
-273	—	—	—	57,53
18,4	—	—	—	54,5
20,0	54,55	54,63	54,73	—
53,8	53,48	53,53	54,63	53,4
79,3	52,63	52,68	52,76	52,4
104,0	51,55	51,63	51,06	51,4
127,9	50,44	50,51	50,62	50,2
151,0	49,09	49,17	49,30	49,0
173,3	47,74	47,83	47,97	47,5
184,3	47,02	47,07	47,23	—
195,1	46,13	46,25	46,34	45,9
205,7	45,25	45,38	45,56	—
216,3	44,28	44,40	44,57	44,0
226,7	43,26	43,39	43,60	—
237,1	42,17	42,32	42,53	—
237,3	—	—	—	41,9
247,3	41,07	41,19	41,42	—
257,0	39,81	39,96	40,14	39,5
267,5	38,43	38,62	38,90	—
277,5	36,99	37,21	37,51	36,6
281,5	36,48	36,61	36,94	—
285,4	35,71	35,93	36,27	—
289,3	35,06	35,28	35,64	—
293,2	34,35	34,59	34,94	—
297,1	33,61	33,86	34,28	—
301,0	32,88	33,15	33,52	32,3
304,9	32,06	32,36	32,78	—

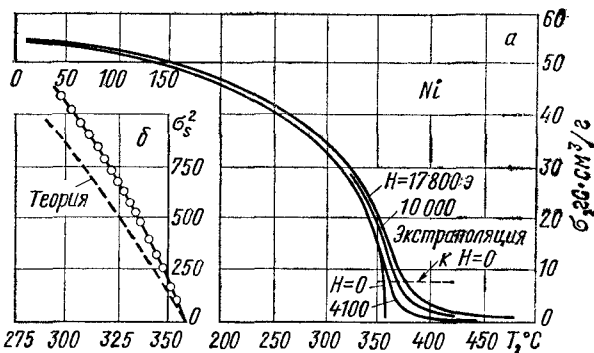


Рис. 28.4. Зависимость удельной намагниченности σ (а) и квадрата самопроизвольной намагниченности насыщения σ_s^2 (б) Ni от температуры [6].

Продолжение табл. 28.8

$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \frac{\text{зс}\cdot\text{см}^3}{\text{э}}$						$\sigma_s, \frac{\text{зс}\cdot\text{см}^3}{\text{э}}$
	$H=1000 \text{ э}$	$H=2000 \text{ э}$	$H=4000 \text{ э}$	$H=8000 \text{ э}$	$H=12000 \text{ э}$	$H=18000 \text{ э}$	
308,8	—	—	30,83	31,24	31,58	32,00	—
312,7	—	—	29,94	30,37	30,71	31,14	—
316,5	28,30	28,65	29,00	29,45	29,87	30,26	28,7
320,3	—	—	27,95	28,44	28,82	29,33	—
324,2	—	—	26,85	27,36	28,28	28,35	—
328,0	—	25,31	25,70	26,28	26,74	27,35	—
331,8	—	24,00	24,39	25,04	25,56	26,28	—
333,7	—	—	—	—	—	—	23,1
335,6	22,08	22,40	22,91	23,66	24,27	25,04	—
339,4	20,42	20,78	21,36	22,21	22,86	23,75	—
341,2	—	—	—	—	—	—	19,8
343,1	18,36	18,85	19,55	20,60	21,39	22,38	—
346,9	16,01	16,62	17,53	18,83	19,81	20,97	16,4
350,7	12,83	13,82	15,12	16,75	17,93	19,37	—
352,5	—	—	—	—	—	—	10,7
354,4	8,36	10,19	12,22	14,46	15,99	17,66	—
358,1	3,68	6,03	8,83	11,95	13,80	15,77	—
361,8	1,78	3,41	5,98	9,41	11,61	13,85	—
365,4	—	2,13	4,13	7,30	9,56	12,06	—
369,1	—	1,51	2,97	5,58	7,72	10,25	—
372,8	—	1,15	2,29	4,43	6,35	8,75	—
376,5	—	0,91	1,82	3,60	5,24	7,39	—
380,1	—	0,75	1,49	2,97	4,38	6,33	—
387,5	—	—	1,11	2,18	3,25	4,80	—
394,8	—	—	—	1,71	2,54	3,79	—
405,7	—	—	0,64	—	1,88	2,83	—

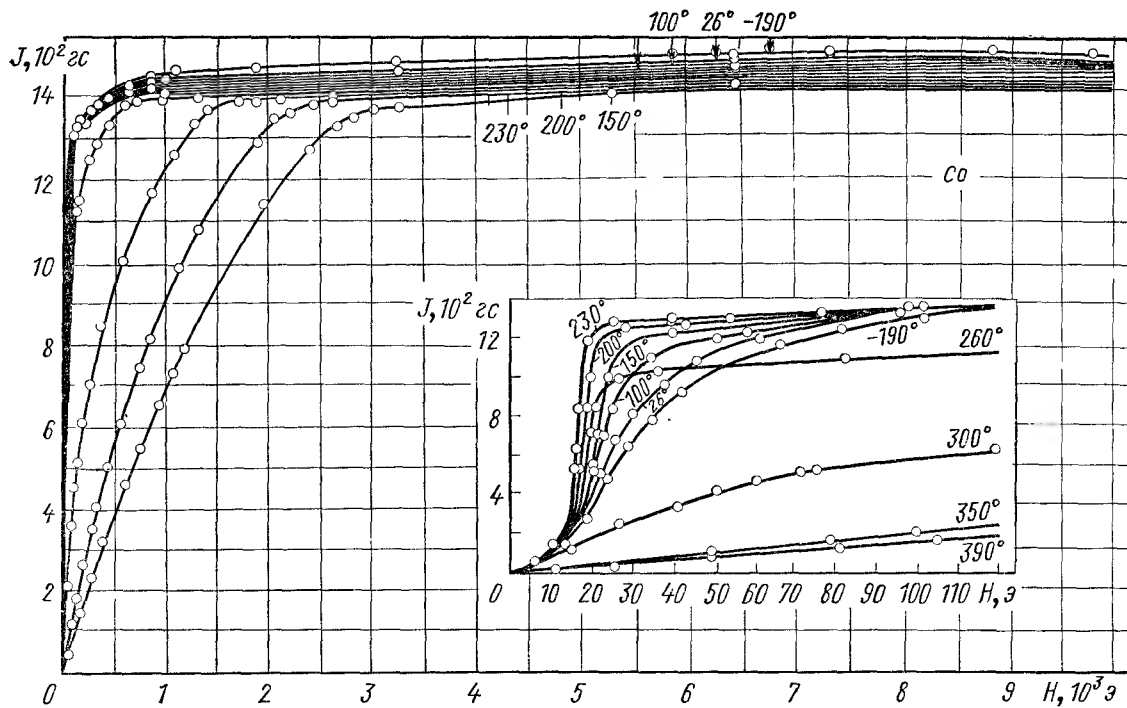


Рис. 28.5. Кривые намагниченности монокристалла Co для гексагональной оси [0001] при различных температурах [1].

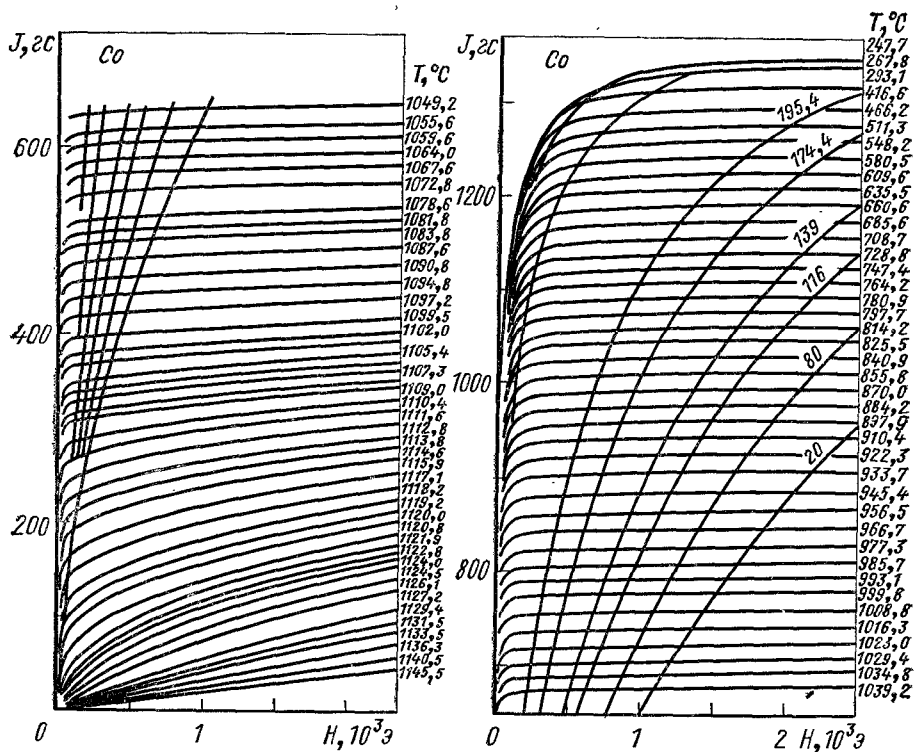


Рис. 28.6. Зависимость намагниченности поликристаллического Co от напряженности магнитного поля и температуры [11]

Кривые намагниченности редкоземельных металлов
(рис. 28.7—28.14)

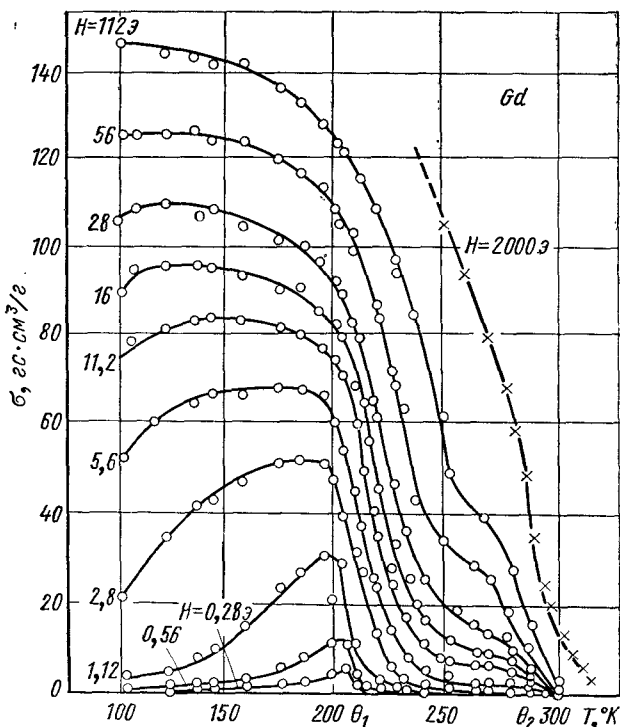


Рис. 28.7. Зависимость удельной намагниченности Gd для различных значений напряженности магнитного поля от температуры [13]. Отмеченные на оси абсцисс точки θ_1 и θ_2 означают соответственно температуры перехода ферромагнетик — антиферромагнетик и антиферромагнетик — парамагнетик [13]

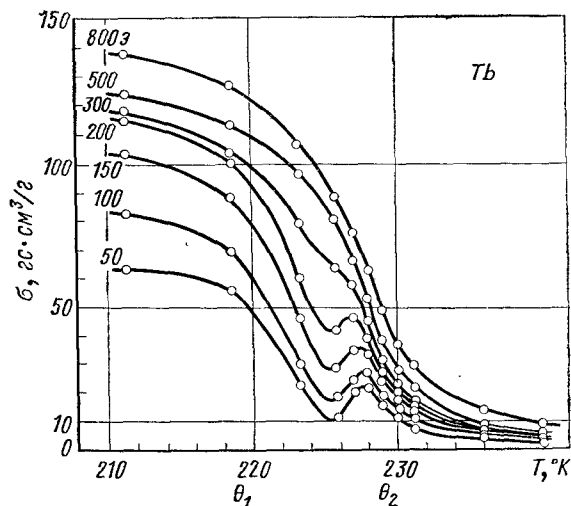


Рис. 28.8. Зависимость удельной намагниченности монокристалла Tb для различных значений напряженности магнитного поля, приложенного в базисной плоскости образца вдоль оси a , от температуры [13].

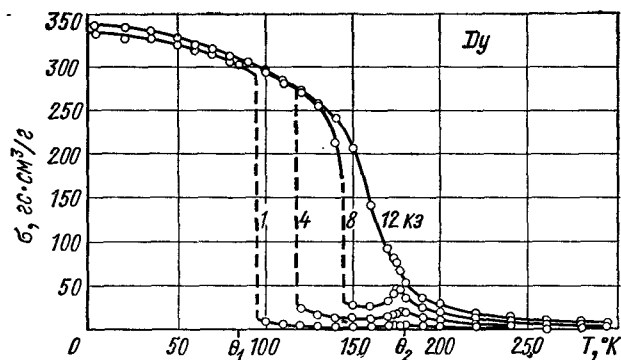


Рис. 28.9. Зависимость удельной намагниченности монокристалла Dy для различных значений напряженности магнитного поля, приложенного вдоль оси a в базисной плоскости образца, от температуры [13]

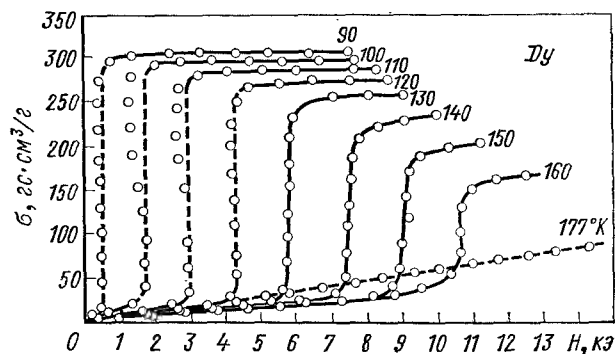


Рис. 28.10. Изотермы удельной намагниченности монокристалла Dy, полученные при направлении магнитного поля вдоль оси a в базисной плоскости образца [13]

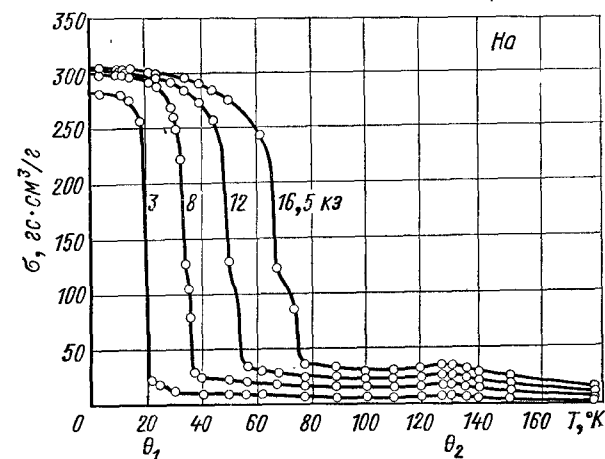


Рис. 28.11. Зависимость удельной намагниченности монокристалла Ho, полученная для различных значений напряженности магнитного поля в базисной плоскости образца вдоль оси a , от температуры [13]

Зависимости удельной намагниченности для ферромагнитных сплавов (рис. 28.15, 28.16)

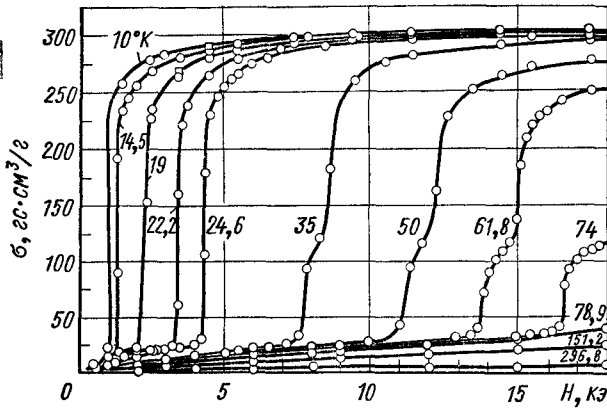


Рис. 28.12. Изотермы удельной намагниченности монокристалла Ho (вектор напряженности магнитного поля направлен вдоль оси a в базисной плоскости образца) [13]

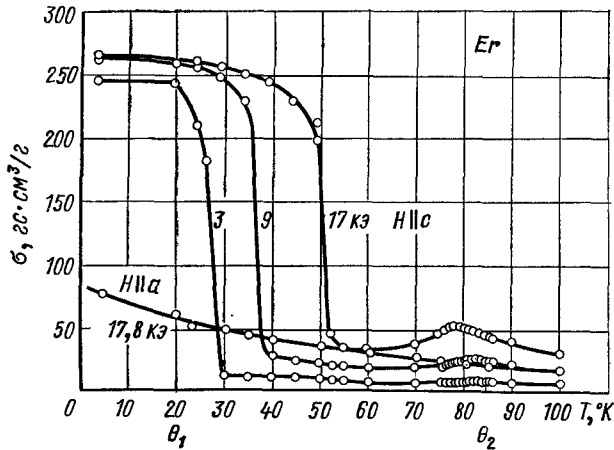


Рис. 28.13. Зависимость удельной намагниченности монокристалла Er для различных значений напряженности магнитного поля, направленного вдоль гексагональной оси c и в базисной плоскости (вдоль оси a), от температуры [13]

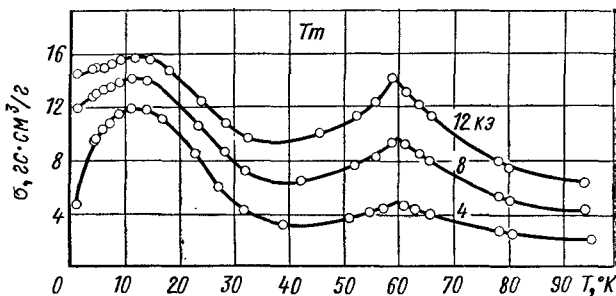


Рис. 28.14. Зависимость удельной намагниченности поликристаллического Tm от температуры при различных значениях напряженности магнитного поля [13]

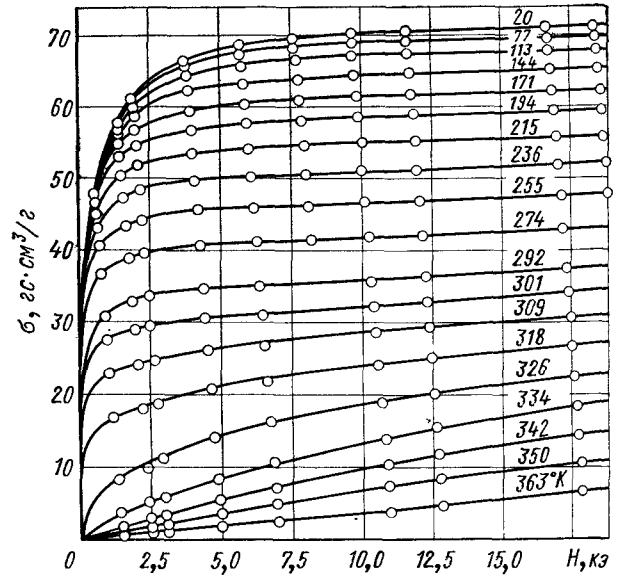


Рис. 28.15. Изотермы удельной намагниченности ферромагнитного сплава Cr — Te [14]

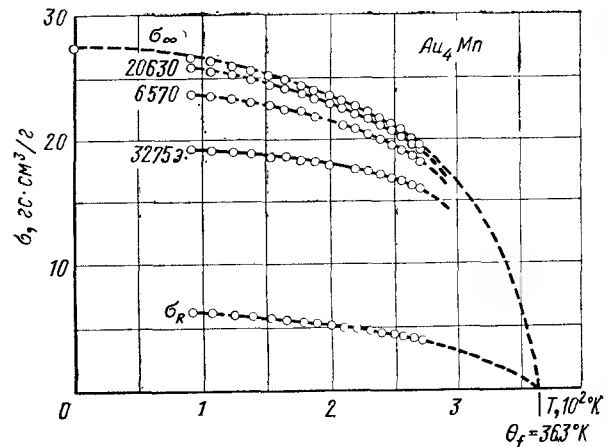


Рис. 28.16. Зависимость удельной намагниченности (при различных значениях напряженности магнитного поля) и остаточной намагниченности ферромагнитного сплава Au_4Mn от температуры [8]

Магнитная анизотропия

На рис. 28.17—28.19 приведены кривые намагниченности $J(H)$ для основных кристаллографических направлений монокристаллов железа, никеля и кобальта.

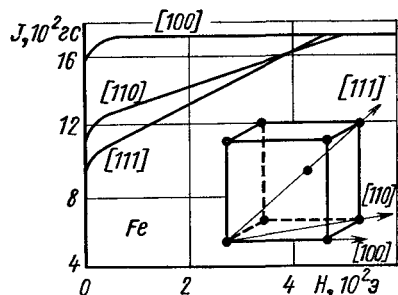


Рис. 28.17. Кривые намагниченности для основных кристаллографических направлений монокристалла Fe [1]

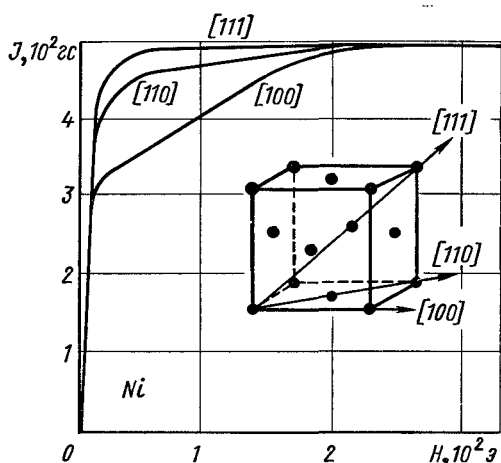


Рис. 28.18. Кривые намагниченности для основных кристаллографических направлений монокристалла Ni [1]

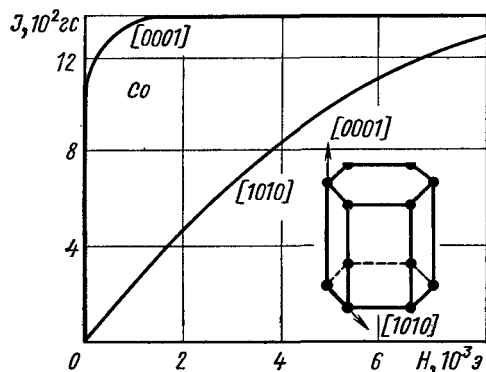


Рис. 28.19. Кривые намагниченности для основных кристаллографических направлений монокристалла Co [1]

Площадь между кривой намагничивания кристалла $J(H)$ и осью J представляет работу, требуемую для намагничивания до насыщения. Направления, в которых эта работа оказывается наименьшей, называют *направлениями легкого намагничивания*. Из рис. 28.17 видно, что в монокристаллах железа направления ребер куба (тетрагональные оси) $[100]$ являются направлениями легкого намагничивания. Направления диагоналей граней $[110]$ (диагональные оси) — *направления промежуточного намагничивания* и направления диагоналей куба $[111]$ (тригональные оси) являются *направлениями трудного намагничивания*.

В случае кристаллов никеля (рис. 28.18) последовательность направлений по трудности намагничивания следующая: легкое направление — ось $[111]$, промежуточное — ось $[110]$ и трудное — ось $[100]$.

В кобальте (рис. 28.19) легким направлением является гексагональная ось $[0001]$, а трудным — любое направление в плоскости базиса.

При количественном рассмотрении магнитной анизотропии кристаллов удобно пользоваться константами магнитной анизотропии $K_1, K_2, \dots$. Они определяются с помощью формул, описывающих зависимость свободной энергии магнитной анизотропии E_a от направления вектора намагниченности по отношению к кристаллографическим осям. Общие выражения для E_a в наиболее важных кристаллических системах имеют вид:

1) для кубических кристаллов (с точностью до членов, не зависящих от направляющих косинусов a_1, a_2, a_3)

$$E_a = K_1 (a_1^2 a_2^2 + a_2^2 a_3^2 + a_3^2 a_1^2) + K_2 a_1^2 a_2^2 a_3^2 + K_3 (a_1^2 a_2^2 + a_2^2 a_3^2 + a_3^2 a_1^2)^2 + \dots;$$

2) для гексагональных кристаллов

$$E_a = K_1 \sin^2 \varphi + K_2 \sin^4 \varphi + K_3 \sin^6 \varphi + K_4 \sin^6 \varphi \cos^2 \psi + \dots,$$

где φ — угол между направлением намагничивания и гексагональной осью $[001]$; ψ — угол между направлением намагниченности и осью $[100]$;

3) для тетрагональных кристаллов

$$E_a = K_1 \sin^2 \vartheta + K_2 \sin^4 \vartheta + K_3 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta + \dots,$$

где ϑ — угол между направлением намагниченности и тетрагональной осью $[001]$; α и β — углы между направлением намагниченности и осями $[100]$ и $[010]$ соответственно.

Коэффициенты K_i ($i = 1, 2, \dots$) зависят от температуры и химического состава ферромагнитного материала (рис. 28.20—28.23). На рис. 28.24 показано, как изменяется направление оси легкого намагничивания в кристалле гадолиния с изменением температуры. В интервале от 0 до 170°K направления легкого намагничивания расположены под углом к гексагональной оси («конус» направлений легкого намагничивания); при этом угол раствора конуса изменяется от 32 до 90° . В области температур 170 — 230°K направления легкого намагничивания лежат в базисной плоскости («плоскость» направлений легкого намагничивания). В интервале температур 250 — 290°K конус разрушается и возникает одно направление легкого намагничивания.

Особенностью магнитокристаллической анизотропии гадолиния является также ее сильная зависимость от магнитного поля. На рис. 28.25 приведена зависимость константы магнитной анизотропии K_1 гадолиния от напряженности магнитного поля H при различных температурах $T, ^\circ \text{C}$.

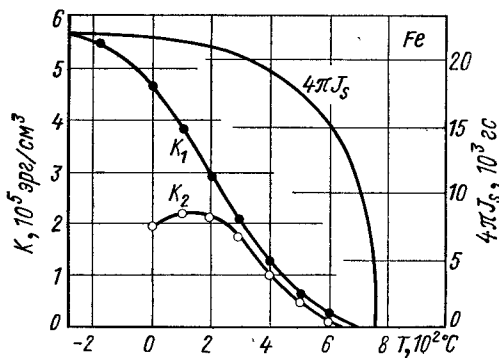


Рис. 28.20. Зависимость констант магнитной анизотропии Fe от температуры [1]

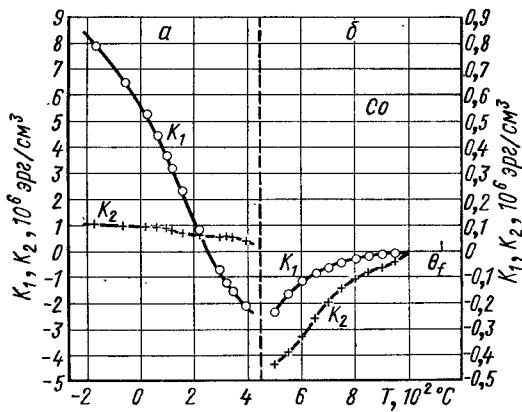


Рис. 28.21. Зависимость констант магнитной анизотропии Co от температуры для гексагональной (а) и кубической гранецентрированной (б) структур [8]

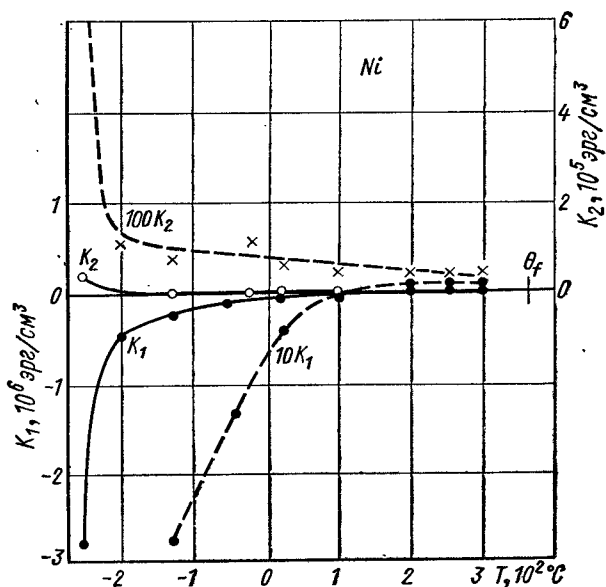


Рис. 28.22. Зависимость констант магнитной анизотропии Ni от температуры [1]

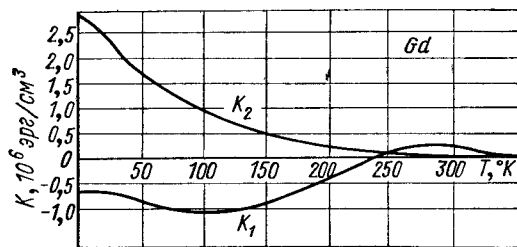


Рис. 28.23. Зависимость констант K_1 и K_2 магнитной анизотропии Gd от температуры [13]

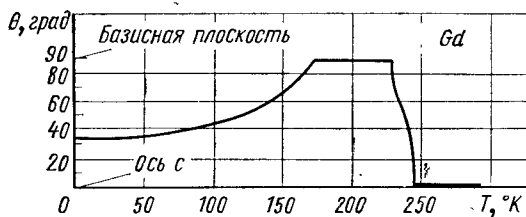


Рис. 28.24. Изменение направления легкого намагничивания Gd с ростом температуры (угол θ отсчитывается от гексагональной оси c кристалла) [13]

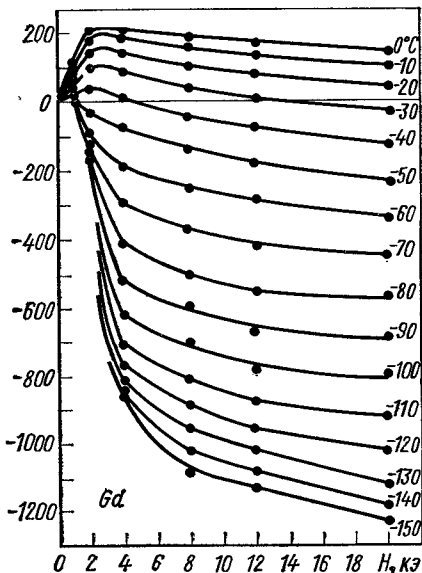
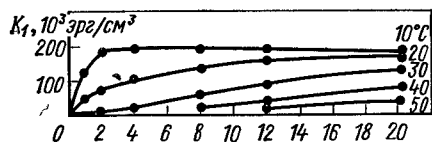


Рис. 28.25. Зависимость константы K_1 магнитной анизотропии Gd от напряженности магнитного поля при различных температурах [13]

Направления легкого намагничивания в тербии и диспрозии лежат в базисной плоскости, а в гольмии и эрбии — под углом к гексагональной оси [13].

Для сплавов Fe — Co, Fe — Ni, Co — Ni и Fe — Co — Ni значения констант магнитной анизотропии K_1 и K_2 при различных температурах T , °C, приведены в табл. 28.9. Из этой таблицы видно, что значения нулевой анизотропии находятся вблизи 70% Ni, 30% Fe для железоникелевого сплава, вблизи 45% Co, 55% Fe для железокобальтового сплава и вблизи 100% Ni для кобальтнелевого сплава. Для тройных сплавов Fe—Co—Ni ход кривой $K_1 = 0$ точно не определен, но полагают, что эта кривая проходит вблизи точки, соответствующей сплаву перминвар (30% Fe, 25% Co, 45% Ni), подвергнутому обычной для этих сплавов термообработке (отжиг при температуре 400—600° C). По измерениям на монокристалле, для этого сплава $K_1 = -2000 \text{ эрг/см}^3$ [6].

В табл. 28.10 приведена последовательность главных направлений легкого, промежуточного и трудного намагничивания кубических кристаллов в зависимости от знаков и соотношения значений констант магнитной анизотропии K_1 и K_2 .

Таблица 28.9

Зависимость констант магнитной анизотропии K_1 и K_2 (10^3 эрг/см^3) для сплавов Fe—Co, Fe—Ni, Co—Ni и Fe—Co—Ni от температуры T [6, 8]

Состав, %			20° C		200° C		300° C		398° C	
Fe	Co	Ni	K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2
100	—	—	420	150	300	22	—	—	—	—
70	30	—	102	160	—	—	—	—	—	—
60	40	—	45	110	—	—	—	—	—	—
50	50	—	—68	—390	—	—	—	—	—	—
30	70	—	—433	50	—	—	—	—	—	—
50	—	50	33	—180	25	—80	18	—7	—	—
35	—	65	15	—70	12	—40	10	—32	—	—
30	—	70	7	—17	2	—4	0	0	—	—
10	—	90	—7	—23	—2	—10	0	—8	—	—
—	—	100	—34	53	5	20	—	—	—	—
—	65	35	—258	150	—	—	—	—	—	—
—	50	50	—108	—40	—	—	—	—	—	—
—	40	60	—74	40	—	—	—	—	—	—
—	20	80	—4	8	—	—	—	—	—	—
—	10	90	16	—40	—	—	—	—	—	—
—	3	97	—10	9	—	—	—	—	—	—
50	10	40	61	—160	19	4	—	—	7	—60
25	25	50	4	16	4	2	—	—	—3	22
20	15	65	9	—110	—1	—18	—	—	—3	2
15	25	60	—26	34	—10	—45	—	—	—3	—15
10	40	50	—72	—4	—54	41	—	—	—9	—102
10	30	60	—38	—80	—17	—50	—	—	—12	—37
10	20	70	—29	17	—25	70	—	—	—14	29
10	10	80	—2	—39	—2	—20	—	—	—2	6

Направления легкого, промежуточного и трудного намагничивания кубических кристаллов в зависимости от констант магнитной анизотропии K_1 и K_2 [1, 6]

K_1	+	+	+	—	—	—
K_2	От $+\infty$ до $\frac{9}{4}K_1$	От $\frac{9}{4}K_1$ до $-9K_1$	От $-9K_1$ до $-\infty$	От $-\infty$ до $\frac{9}{4}K_1$	От $\frac{9}{4}K_1$ до $9K_1$	От $9K_1$ до $+\infty$
Легкое	[100]	[100]	[111]	[111]	[110]	[110]
Промежуточное	[110]	[111]	[100]	[110]	[111]	[100]
Трудное	[111]	[110]	[110]	[100]	[100]	[111]

Значения констант магнитной анизотропии для сплавов железа и других ферромагнетиков приведены на рис. 28. 26—28.28 и в табл. 28.11 и 28.12.

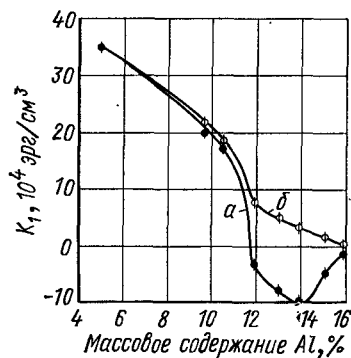


Рис. 28.26. Зависимость константы магнитной анизотропии при комнатной температуре от состава сплавов Fe—Al [8]:

а — после медленного охлаждения (упорядоченный сплав); б — после закалки от 650° C (неупорядоченный сплав)

Константы магнитной анизотропии K_1 соединений кобальта с редкоземельными элементами при температуре 27 и -196°C [5]

Соединение	Co_6Ce	Co_6Nd	Co_6Pr	Co_6Sm	Co_6Y
$K_1, 10^7 \text{ эрг/см}^3 (27^\circ\text{C})$	2,1	1,2	7,0	4,7	5,7
$K_1, 10^7 \text{ эрг/см}^3 (-196^\circ\text{C})$	—	-33,9	-6,0	—	—

Зависимость $K = K_1 + K_2$ для гексагонального кристалла MnBi от T см. на рис. 28.29.

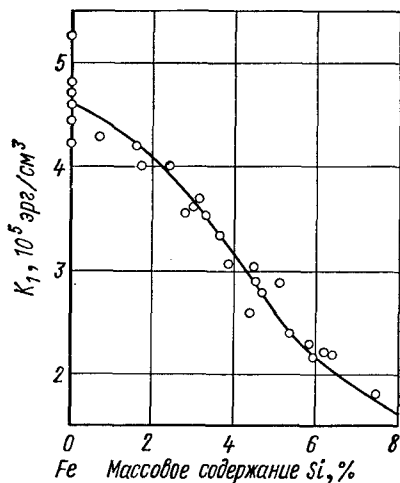


Рис. 28.27. Зависимость константы анизотропии K_1 для сплавов Fe — Si при температуре 20°C от содержания кремния по данным разных авторов [8]

Таблица 28.11

Зависимость констант магнитной анизотропии K_1 и K_2 от температур сплавов Fe—Si [8]

Содержание Si, %	$T, ^\circ\text{C}$	$K_1, 10^4 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3}$	$K_2, 10^4 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3}$
0	-196	$52,0 \pm 1,0$	0 ± 5
0	-78	$50,5 \pm 1,0$	0 ± 5
0	27	$48,0 \pm 1,0$	0 ± 5
$3,1 \pm 1$	-196	$42,5 \pm 1,0$	—
$3,1 \pm 1$	-78	$40,5 \pm 1,0$	—
$3,1 \pm 1$	27	$36,5 \pm 1,0$	—
$5,1 \pm 1$	-196	$35,5 \pm 1,0$	-5 ± 5
$5,1 \pm 1$	-78	$32,5 \pm 1,0$	-5 ± 5
$5,1 \pm 1$	27	$28,5 \pm 1,0$	-5 ± 5

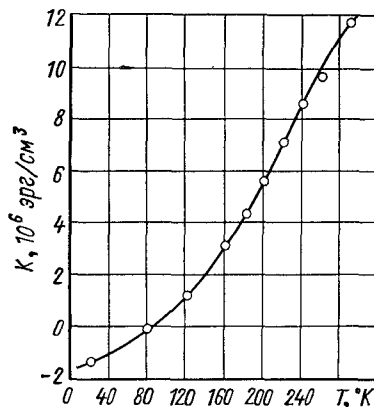


Рис. 28.29. Зависимость константы $K = K_1 + K_2$ для гексагонального кристалла MnBi от температуры. При температуре 20°C
 $K_1 = 9,1 \cdot 10^6 \text{ эрг/см}^3$,
 $K_2 = 2,6 \cdot 10^6 \text{ эрг/см}^3$ [8]

Магнитострикция

Изменения размеров тела, вызванные изменениями его намагниченности, называют *магнитострикцией*. Изменение объема тела называют *объемной магнитострикцией*, а изменение размеров тела при постоянном объеме — *линейной магнитострикцией*.

Объемная магнитострикция. Относительное изменение объема $\Delta V/V = \omega$ при изменении намагниченности в общем случае складывается из трех составляющих различного происхождения [8]:

$$\omega = \omega_I + \omega_K + \omega_F.$$

Член ω_I зависит только от истинной намагниченности ($J - J_s > 0$). Изменение объема ω_I может происходить под воздействием температуры (изменение самопроизвольной намагниченности) и при изотермическом изменении истинной намагниченности во внешнем поле. В сильных магнитных полях, когда изменение ориентации вектора намагниченности уже не происходит, ω_I в общем изменяется линейно с напряженностью магнитного поля. В сильных полях $(d\omega_I/dH)r$ зависит только от материала и температуры. Член ω_K описывает изменение объема кристалла в зависимости от ориентации

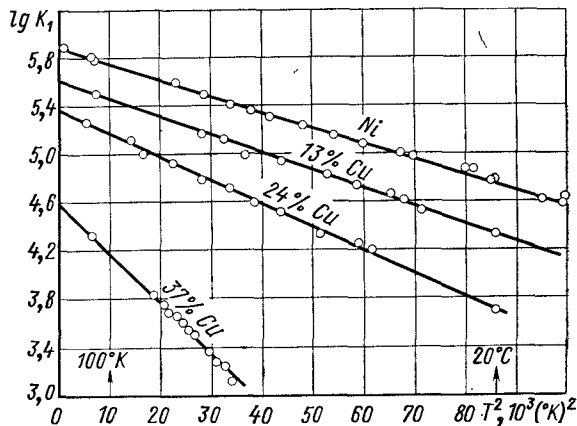


Рис. 28.28. Зависимость константы магнитной анизотропии сплавов Ni — Cu от квадрата абсолютной температуры и состава [6]

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ самопроизвольной намагниченности по отношению к кристаллографическим осям при постоянной температуре. «Эффект формы» ω_F зависит только от формы образца и от общей намагниченности и, таким образом, не является свойством материала.

Линейная магнитострикция. Относительное изменение длины $\lambda_{\alpha\beta} = (\Delta l/l)_{\alpha\beta}$ в направлениях $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ при изотермическом намагничивании ферромагнитного кристалла до насыщения в направлениях $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ называют *магнитострикцией насыщения* при условии, что в начальном состоянии намагниченность кристалла была ориентирована по направлению легкого намагничивания (идеально размагниченное состояние).

Для кубических кристаллов $\lambda_{\alpha\beta}$ дается выражением

$$\begin{aligned} \lambda_{\alpha\beta} = & h_1 (\alpha_1^2 \beta_1^2 + \alpha_2^2 \beta_2^2 + \alpha_3^2 \beta_3^2 - 1/3) + \\ & + 2h_2 (\alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2 + \alpha_2 \alpha_3 \beta_2 \beta_3 + \alpha_3 \alpha_1 \beta_3 \beta_1) + h_4 (\alpha_1^4 \beta_1^2 + \\ & + \alpha_2^4 \beta_2^2 + \alpha_3^4 \beta_3^2 + \frac{2}{3} s - 1/3) + 2h_5 (\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \beta_1 \beta_2 + \\ & + \alpha_2 \alpha_3 \alpha_1^2 \beta_2 \beta_3 + \alpha_3 \alpha_1 \alpha_2^2 \beta_3 \beta_1) + \dots + \\ & + h_3 s - \text{(если ось [100] является направлением легкого намагничивания)} \text{ или} \\ & + h_3 (s - 1/3) - \text{(если направлением легкого намагничивания является ось [111])}. \end{aligned} \quad (28.1)$$

Здесь $h_1, \dots, h_5$ — константы и $s = \alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2$. Направляющие косинусы α_i, β_i относятся к кубическим осям. Этого приближения достаточно, чтобы описывать экспериментальные результаты.

Из уравнения (28.1) можно получить член объемной магнитострикции ω_K :

$$\omega_K = 3h_3 s$$

(если ось [100] является направлением легкого намагничивания),

$$\omega_K = 3h_3 (s - 1/3) \quad (28.2)$$

(если направлением легкого намагничивания является ось [111]) и продольную магнитострикцию ($\alpha_i = \beta_i$) по главным кристаллографическим осям [100], [110] и [111]:

$$\begin{aligned} \lambda_{100} = \frac{2}{3} h_1 + \frac{2}{3} h_4; \quad \lambda_{110} = \frac{1}{6} h_1 + \frac{1}{2} h_2 + \frac{1}{12} h_4; \\ \lambda_{111} = \frac{2}{3} h_2 + \frac{2}{9} h_5. \end{aligned} \quad (28.3)$$

При $h_3 = h_4 = h_5 = 0$ получается упрощенное выражение:

$$\begin{aligned} \lambda_{\alpha\beta} = \frac{3}{2} \lambda_{100} (\alpha_1^2 \beta_1^2 + \alpha_2^2 \beta_2^2 + \alpha_3^2 \beta_3^2 - 1/3) + \\ + 3\lambda_{111} (\alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2 + \alpha_2 \alpha_3 \beta_2 \beta_3 + \alpha_3 \alpha_1 \beta_3 \beta_1) \end{aligned} \quad (28.4)$$

только с двумя константами λ_{100} и λ_{111} , которых часто достаточно для описания экспериментальных результатов.

Для поликристаллического материала с произвольным распределением ориентации кристаллических осей из соотношений (28.3) можно получить линейную магнитострикцию в виде:

$$\lambda_0 = \frac{3}{2} \lambda_s \left(\cos^2 \theta - \frac{1}{3} \right), \quad (28.5)$$

где

$$\lambda_s = \frac{2\lambda_{100} + 3\lambda_{111}}{5}. \quad (28.6)$$

Здесь θ — угол между направлением измерения и направлением намагниченности. Из уравнения (28.1) получаем выражение для объемной магнитострикции поликристалла:

$$\omega_K = (3/5) h_3,$$

если оси [100] являются направлениями легкого намагничивания, или

$$\omega_K = - (2/5) h_3, \quad (28.7)$$

если оси [111] являются направлениями легкого намагничивания.

Магнитострикция насыщения гексагональных кристаллов описывается выражением

$$\begin{aligned} \lambda_{\alpha\beta} = & \lambda_A [(\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2)^2 - (\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2) \alpha_3 \beta_3] + \\ & + \lambda_B [(1 - \alpha_3^2) (1 - \beta_3^2) - (\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2)^2] + \\ & + \lambda_C [(1 - \alpha_3^2) \beta_3^2 - (\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2) \alpha_3 \beta_3] + \\ & + 4\lambda_D (\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2) \alpha_3 \beta_3 \end{aligned} \quad (28.8)$$

с четырьмя константами $\lambda_A, \dots, \lambda_D$. Направляющие косинусы α_i, β_i относятся к системе прямоугольных координат, где ось z совпадает с гексагональной осью [001], а оси x, y — с направлениями [100] и [120] соответственно. Объемная магнитострикция монокристалла дается выражением

$$\omega_K = (\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C) (1 - \alpha_3^2). \quad (28.9)$$

Для поликристаллического материала с произвольно ориентированными кристаллическими осями *продольная магнитострикция насыщения* (измеренная параллельно направлению намагничивания, т. е. $\alpha_i = \beta_i$) может быть получена из уравнения (28.8):

$$\lambda_{\parallel} = \lambda_s = \frac{2}{5} \lambda_A + \frac{8}{15} \lambda_D. \quad (28.10)$$

Поперечная магнитострикция насыщения выражается формулой

$$\lambda_{\perp} = \frac{2}{15} \lambda_A + \frac{1}{3} (\lambda_B + \lambda_C) - \frac{4}{15} \lambda_D, \quad (28.11)$$

а объемная определяется соотношением

$$\omega_K = \frac{2}{3} (\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C). \quad (28.12)$$

В сильных полях (выше технического насыщения, т. е. при $J > J_s$) зависимость $(\Delta l/l)_{\alpha\beta}$ от напряженности магнитного поля в основном линейна. Эта так называемая «вынужденная» магнитострикция описывается для кубических кристаллов выражением

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\Delta l/l)_{\alpha\beta}}{\partial H} = & h'_0 + h'_1 (\alpha_1^2 \beta_1^2 + \alpha_2^2 \beta_2^2 + \alpha_3^2 \beta_3^2 - \frac{1}{3}) + \\ & + 2h'_2 (\alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2 + \alpha_2 \alpha_3 \beta_2 \beta_3 + \alpha_3 \alpha_1 \beta_3 \beta_1) + \dots \end{aligned} \quad (28.13)$$

с константами h'_0, h'_1, h'_2 . Здесь $h'_0 = \frac{1}{3} \left(\frac{\partial \omega_l}{\partial H} \right)$ — изменение длины, соответствующее члену ω_l изотропной объемной магнитострикции.

Константы, входящие в уравнения (28.1)–(28.13), определяются экспериментально. (см. табл. 28.13–28.23 и рис. 28.30–28.64).

Таблица 28.13

Производная $(\partial \omega_I / \partial H)_T$ для металлов и сплавов в сильных магнитных полях [8]

Вещество	$T, ^\circ\text{C}$	$\left(\frac{\partial \omega_I}{\partial H}\right)_T \cdot 10^{-10} \frac{\text{эрг}}{\text{г}}$	Вещество	$T, ^\circ\text{C}$	$\left(\frac{\partial \omega_I}{\partial H}\right)_T \cdot 10^{-10} \frac{\text{эрг}}{\text{г}}$
Fe	20	~6	40%Ni + 60%Fe	20	~32
Ni	20	-0,55	50%Ni + 50%Fe	20	~4
Ni	280	-6	3%Al + 97%Fe	20	8
Ni	348	-36	8,1%Al + 91,9%Fe	20	8
Co	20	~6	11,9%Al + 88,1%Fe	20	7
20%Ni + 80%Fe	20	~20	15%Al + 85%Fe	20	14
30%Ni + 70%Fe	20	~300	16,9%Al + 83,1%Fe	20	30

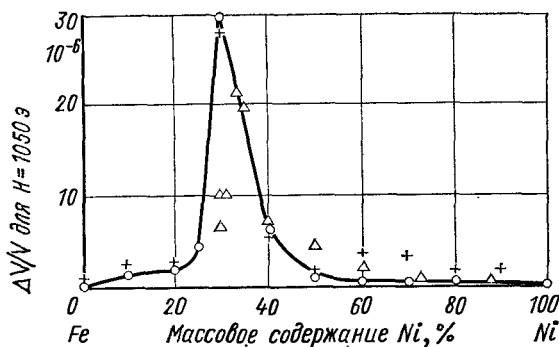


Рис. 28.30. Изменение объема $\Delta V/V$ сплавов Fe — Ni (при температуре 20°C) при изменении напряженности магнитного поля от 0 до 1050 эрг по данным разных авторов [8]

Таблица 28.14

Константы магнитострикции железа при 20°C [8]

$\lambda_{100} \cdot 10^{-6}$	$\lambda_{111} \cdot 10^{-6}$	Вычислено по формуле (28.6) $\lambda_s \cdot 10^{-6}$	Измерено при 20°C $\lambda_s \cdot 10^{-6}$
20,3	-21,1	-4,5	-10 ± 2

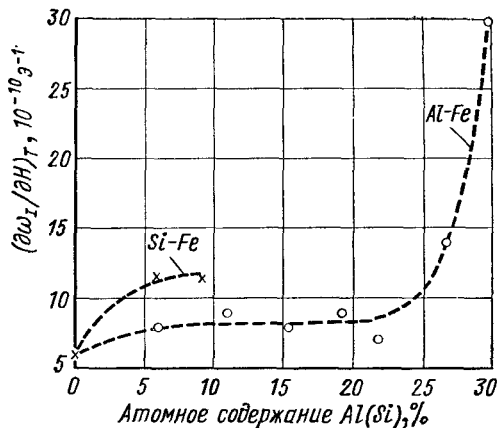


Рис. 28.31. Зависимость производной $(\partial \omega_I / \partial H)_T$ для сплавов Si — Fe и Al — Fe от концентрации Al(Si) [8]

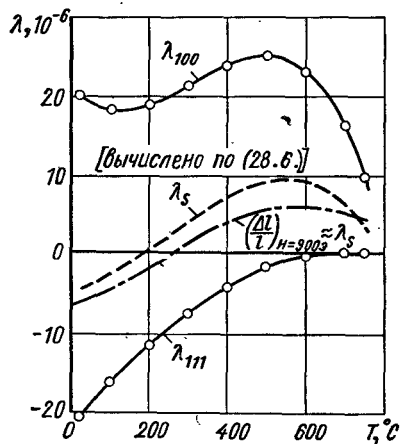


Рис. 28.32. Зависимость константы магнитострикции λ_{100} и λ_{111} Fe от температуры [8]

Таблица 28.15

Константы магнитострикции монокристалла кобальта [8]

$\lambda_A \cdot 10^{-6}$	$\lambda_B \cdot 10^{-6}$	$\lambda_C \cdot 10^{-6}$	$\lambda_D \cdot 10^{-6}$	$\omega_K \cdot 10^{-6}$
-45	-95	+110	-100	-30 ($1 - a_3^2$) [см. уравнение (28.9)]

Таблица 28.16

Константа магнитострикции поликристаллического кобальта (см. также рис. 28.33)

$\lambda_s \cdot 10^{-6}$ [см. уравнение (28.10)]	$\omega_K \cdot 10^{-6}$ [см. уравнение (28.12)]
-71,4	-20

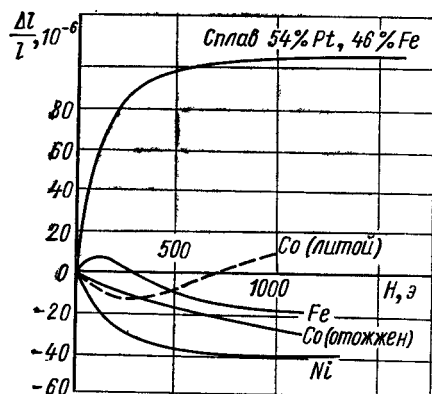


Рис. 28.33. Зависимость относительного изменения длины ($\Delta l/l$) поликристаллических образцов Fe, Co, Ni и сплава (54% Pt + 46% Fe) при температуре 20 °C от напряженности магнитного поля [15]

Таблица 28.17

Константы магнитострикции никеля при температуре 20 °C [8]

$h_1, 10^{-6}$	$h_2, 10^{-6}$	$h_3, 10^{-6}$	$h_4, 10^{-6}$	$h_5, 10^{-6}$
$-68,8 \pm 3,8$	$-36,5 \pm 1,9$	$-2,8 \pm 3,1$	$-7,7 \pm \pm 5,2$	$7,7 \pm 3,1$

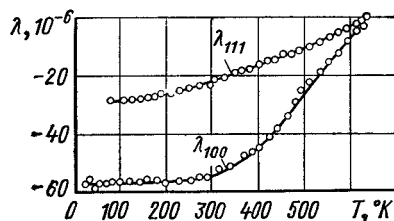


Рис. 28.35. Зависимость констант магнитострикции λ_{100} и λ_{111} Ni от температуры [8]

Таблица 28.18

Константы магнитострикции сплава 22% Fe + 78% Ni (пермаллой) при температуре 20 °C [8]

Охлаждение	$h_1, 10^{-6}$	$h_2, 10^{-6}$	$h_3, 10^{-6}$	$h_4, 10^{-6}$	$h_5, 10^{-6}$
Быстрое	13,7 ($\pm 1,0$)	2,6 ($\pm 0,5$)	-0,3 ($\pm 0,8$)	1,1 ($\pm 1,4$)	-0,1 ($\pm 0,8$)
Медленное	20,9 ($\pm 0,7$)	2,8 ($\pm 0,3$)	1,7 ($\pm 0,5$)	-1,4 ($\pm 1,0$)	-0,2 ($\pm 0,5$)

Таблица 28.19

Температурная зависимость константы λ_s некоторых поликристаллических сплавов железо — никель [8] (см. также рис. 28.36 и 28.37)

Содержание Ni в сплаве, %	$\lambda_s, 10^{-6}$	
	20 °C	-186 °C
36	20,3	30,5
46	25,4	30,7
50	24,3	26,8
70	11,6	12,6

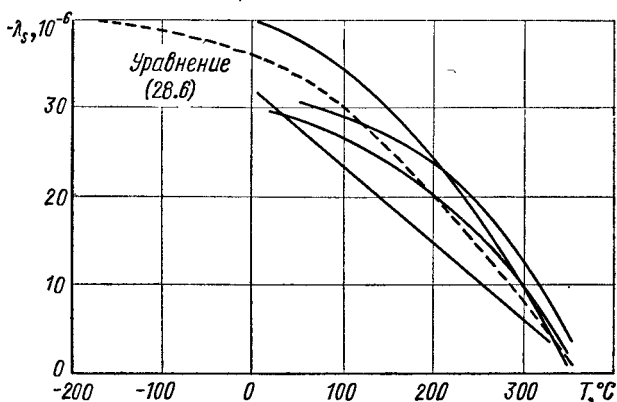


Рис. 28.34. Зависимость константы магнитострикции λ_s поликристаллического Ni от температуры по данным работ различных авторов [8]

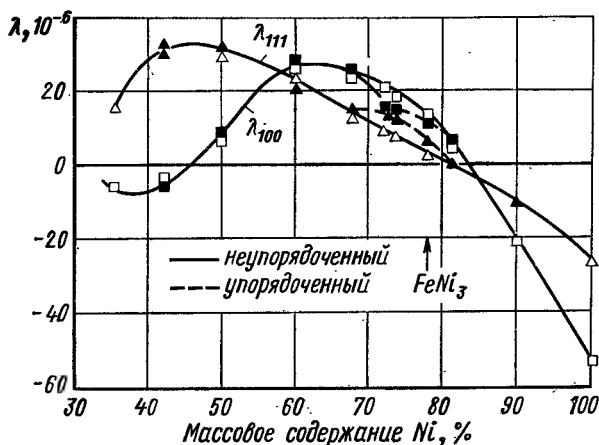


Рис. 28.36. Зависимость константы магнитострикции λ_{100} и λ_{111} кубических гранцентрированных сплавов Fe — Ni при температуре 20 °C от концентрации никеля [8]

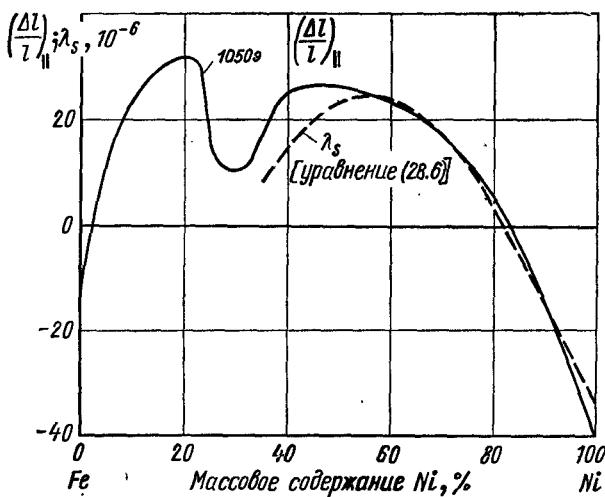


Рис. 28.37. Относительное изменение длины $(\Delta l/l)_{\parallel}$ в магнитном поле напряженностью 1050 э и константа λ_s , вычисленная по формуле (28.6) на основании данных рис. 28.36 для поликристаллических сплавов Fe — Ni различных составов при температуре 20°C [8]

Таблица 28.20

Влияние структурного упорядочения на константу λ_s сплава Ni_3Fe при температуре 20°C [8]

λ_s , 10^{-6} (данные различных авторов)

Неупорядоченный сплав	Упорядоченный сплав
1,9	4,15
7,1	10,1
8,5	10,7

Характеристики моно- и поликристаллических сплавов железо — кобальт (рис. 28.38 и 28.39)

В ряде областей техники находят применение магнитострикционный сплав железа с кобальтом марки К-65, для которого в поле насыщения $\Delta l/l \geq 10^{-4}$ [16].

Таблица 28.21

Химический состав сплава К-65 [16]

Элемент	Co	C	Si	Mn	S	P	Fe
Содержание, %	63,0—65,0	0,05	0,15—0,30	0,30—0,60	0,025	0,02	Остальное

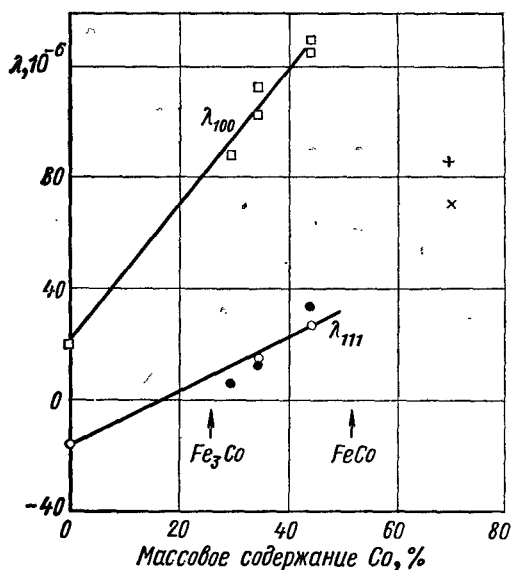


Рис. 28.38. Константы магнитострикции λ_{100} и λ_{111} кубических объемноцентрированных сплавов Fe — Co различных составов при температуре 20°C по данным работ различных авторов [8]

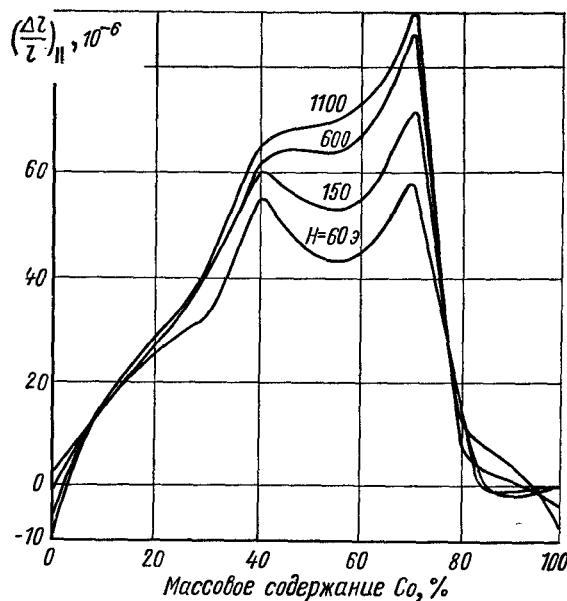


Рис. 28.39. Зависимость относительного изменения длины $(\Delta l/l)_{\parallel}$ поликристаллических сплавов Fe — Co в магнитных полях напряженностью от 60 до 1100 э от содержания Co при температуре 20°C [8]

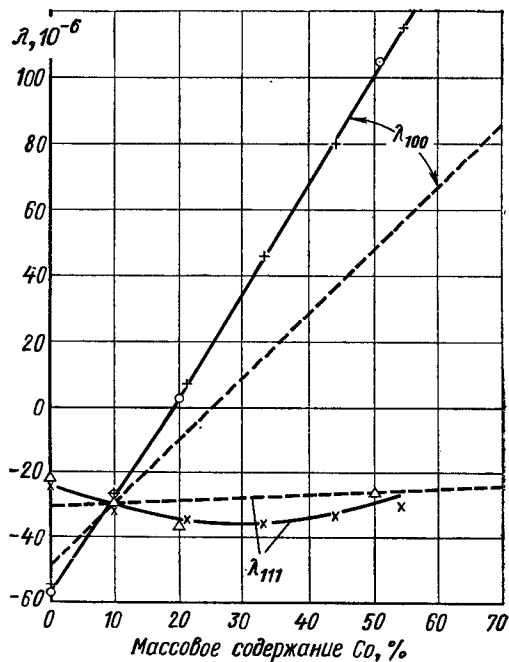


Рис. 28.40. Константы магнитострикции λ_{100} и λ_{111} кубических гранецентрированных сплавов Ni — Co различных составов при температуре 20 °C [8]

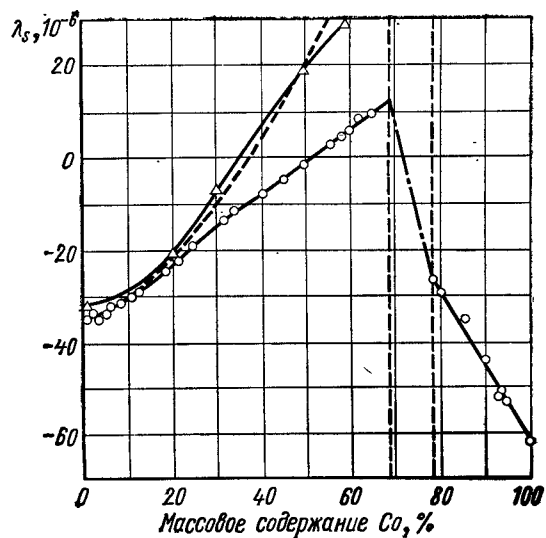


Рис. 28.41. Константа магнитострикции λ_s поликристаллических сплавов Ni — Co различных составов при температуре 20 °C. Обозначения $\circ$ и Δ соответствуют данным работ различных авторов. Пунктир — вычисления по данным рис. 28.40 [8].

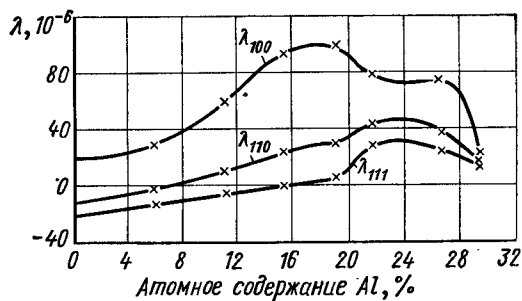


Рис. 28.42. Константы магнитострикции λ_{100} , λ_{111} и λ_{110} медленно охлажденных (упорядоченных) сплавов Fe — Al при температуре 20 °C [8]

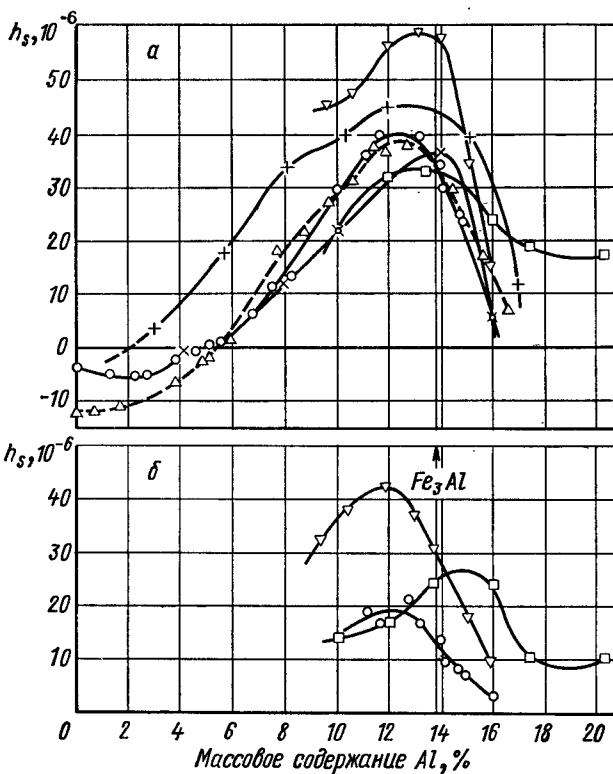


Рис. 28.43. Константа магнитострикции h_s упорядоченных (а) и неупорядоченных (б) поликристаллических сплавов Fe — Al при температуре 20 °C по данным работ различных авторов [8]

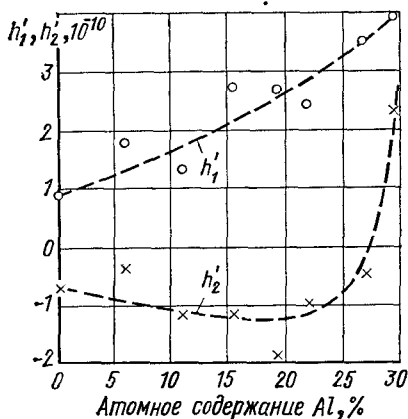


Рис. 28.44. Константы h'_1 и h'_2 «вынужденной» магнитострикции сплавов Fe — Al при температуре 20° С [8]

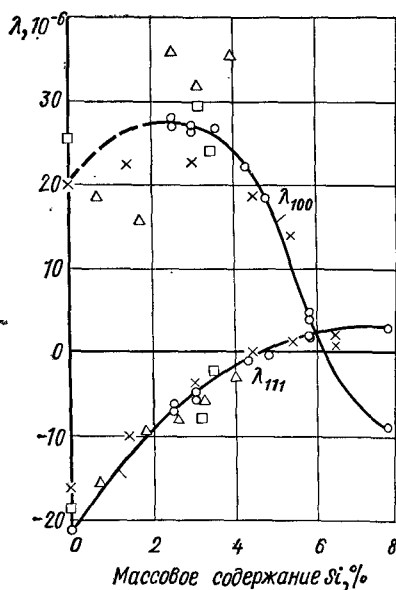


Рис. 28.45. Константы магнитострикции λ_{100} и λ_{111} сплавов Fe — Si при температуре 20°С по данным работ различных авторов [8]:

× — неупорядоченные сплавы; □, △, ○ — упорядоченные сплавы

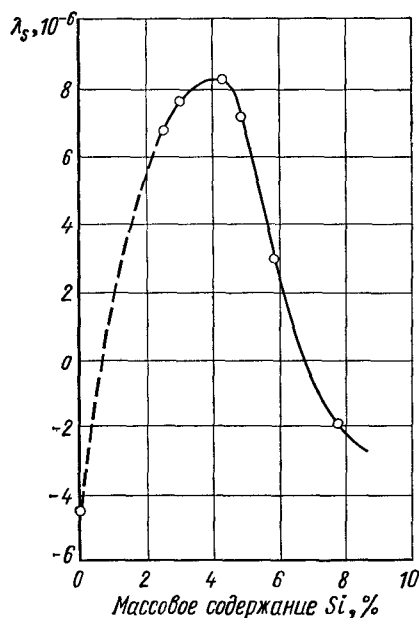


Рис. 28.46. Константа магнитострикции λ_s поликристаллических сплавов Fe — Si при температуре 20°С. Значения λ_s вычислены по (28.6). Пунктир соответствует области, для которой нет экспериментальных данных [8].

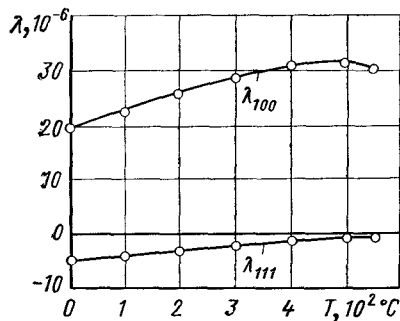


Рис. 28.47. Зависимость констант магнитострикции λ_{100} и λ_{111} сплава Fe + 3,5% Si от температуры [8].

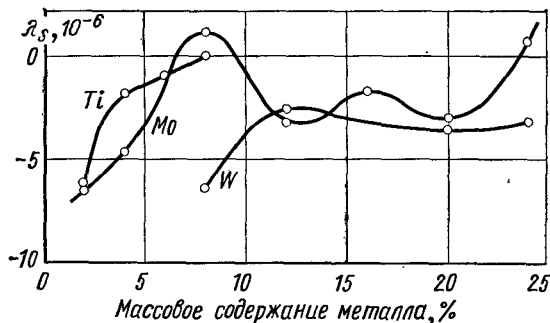


Рис. 28.48. Константа магнитострикции λ_s поликристаллических бинарных сплавов Fe с Ti, Mo и W при температуре 20° С [8]

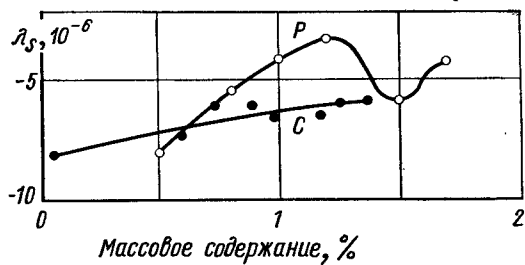


Рис. 28.49. Константа магнитострикции λ_s поликристаллических бинарных сплавов Fe с C и P при температуре 20 °C [8]

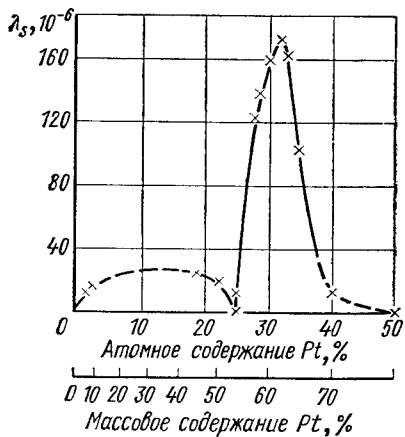


Рис. 28.50. Константа магнитострикции λ_s системы Fe — Pt при комнатной температуре [8]

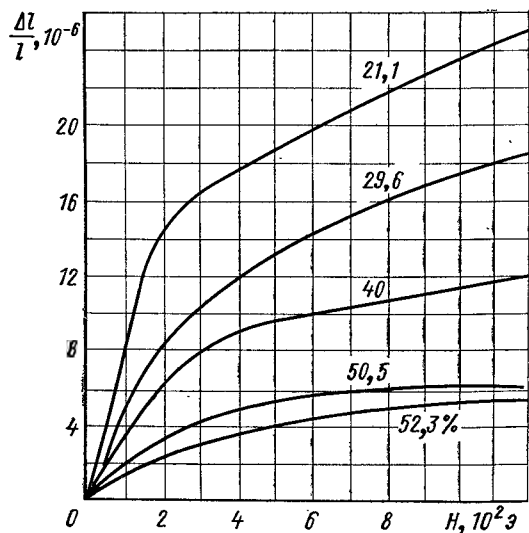


Рис. 28.51. Относительное изменение длины ($\Delta l/l$) сплавов Fe — C после закалки от 1050°C в масле в зависимости от содержания C и напряженности магнитного поля [16]

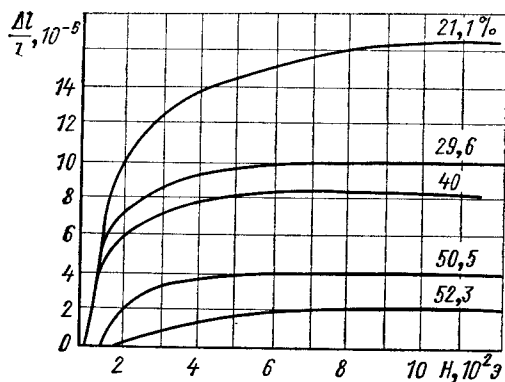


Рис. 28.52. Относительное изменение длины ($\Delta l/l$) сплавов Fe — C после отжига при 900°C в течение 2 ч в зависимости от содержания C и напряженности магнитного поля [16]

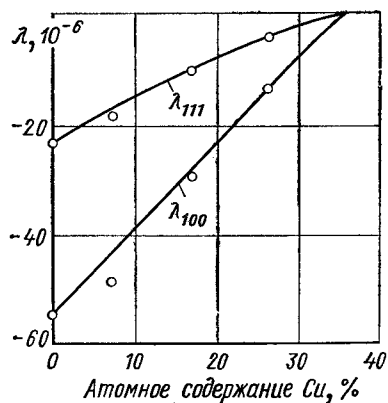


Рис. 28.53. Константы магнитострикции λ_{100} и λ_{111} сплавов Ni — Si различных составов при температуре 20°C [8]

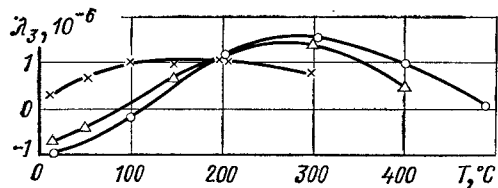


Рис. 28.54. Зависимость константы магнитострикции λ_s сплава Ni_3Mn от температуры при различных степенях упорядочения [8]:
○ — упорядоченный; △ — закаленный от 400° C; × — закаленный от 480° C

Константа магнитострикции λ_s поликристаллических бинарных сплавов никеля [8]

Атомный состав, %				$\lambda_s, 10^{-6}$			$\theta_f, ^\circ\text{C}$	Термообработка
Ni	Co	X	Остальное	17°C	-183°C	-273°C		
99,3	0,5	—	0,2	-32,5	-35	-36	357	
91,0	0,4	8,3Al	0,3	-7,1	-14,5	-16	137	
87,0	0,5	12,5Al	0	0	-8,0	-9,2	22	1 ч 700°C медленное охлаждение
84,3	0,5	15,1Al	0,1	0	-5,0	-8,5	-78	
94,9	1,0	4,1Si	0,2	-15,5	-22	-22,5	243	
89,5	1,0	9,2Si	0,3	-1,2	-7,0	-9,5	94	
95,3	0,7	3,5V	0,5	-15,5	-23	-24	219	
93,0	0,4	6,4V	0,2	-1,7	-11,5	-14	52	
89,7	0,4	9,6V	0,3	0	-1,2	-2,2	-150	
98,1	0,5	1,1Cr	0,3	-26	-32	-33	317	
94,3	0,5	4,05Cr	0,2	-8,5	-18	-19	157	
89,8	0,5	9,3Cu	0,4	-24	-32	-33	263	
80,7	0,6	18,7Cu	0	-12,5	-21,5	-23	177	
71,3	0,4	28,1Cu	0,2	-3,2	-13,5	-14,5	74	
97,5	0,5	1,85Mo	0,2	-22,5	-29,5	-30	277	
94,4	0,5	5,0Mo	0,1	-3,5	-12	-14	82	
97,6	0,5	1,4Sn	0,5	-27,5	-32,5	-33	314	
96,4	0,5	3,0Sn	0,1	-22	-29	-30	264	
94,7	0,4	4,9Sn	0	-15,5	-23	-23,5	209	
97,1	0,75	1,65W	0,5	-22,5	-29	-30	212	
95,6	0,8	3,35W	0,3	-11,5	-18	-19	164	
93,5	0,9	5,05W	0,5	-2,5	-11,5	-13	127	
93,2	0,5	6,0Mn	0,3	-18,5	-24,5	-24,5	297	1 ч, 800°C, медленное охлаждение
87,9	0,5	11,4Mn	0,2	-8,0	-13,5	-13,5	209	
83,3	0,8	13,7Mn	2,0	-0,6	-7,6	-9	127	Упоряд. 2 ч 450°C
78,8	0,3	19,7Mn	1,2	+1,3	-0,5	-0,7	—	
77,1	0	22,7Mn	0,2	+1,8	-0,5	-1,3	—	
83,3	0,8	13,7Mn	2,0	-0,85	-7,4	-7,8	—	Неупоряд. 1/2 ч 800°C Закаленный
78,8	0,3	19,7Mn	1,2	—	0	-0,6	—	
77,1	0	22,7Mn	0,2	—	-0,15	-0,25	—	
80	—	20Pd	—	-39,0	-45,0	-46	302	
90	—	10Pd	—	-35,0	-40,0	-41	—	
85,6	0,5	10Fe, 3,9Cr	0	-4,9	-6,0	-6,0	351	
85,1	0,5	10,1Fe, 3,9W	0,4	-2,2	-3,1	-3,2	330	
65	—	16Pd, 19Fe	—	0	+0,7	—	502	

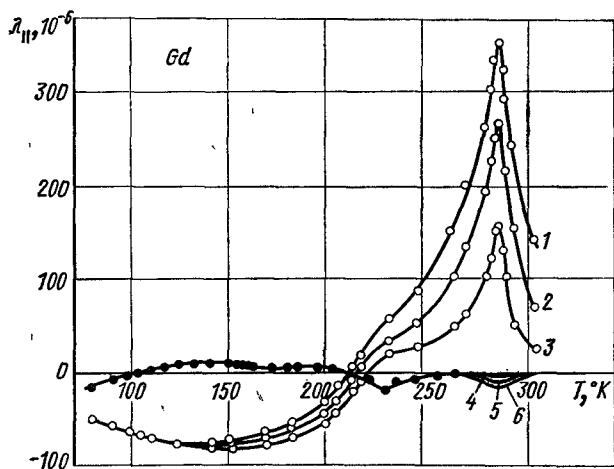


Рис. 28.55. Зависимость продольной магнитострикции монокристалла Gd вдоль осей c (кривые 1, 2, 3) и a (кривые 4, 5, 6) при различных значениях напряженности магнитного поля от температуры [13]:

1, 6 — $H = 14000$ э; 2, 5 — $H = 9000$ э; 3, 4 — $H = 5000$ э

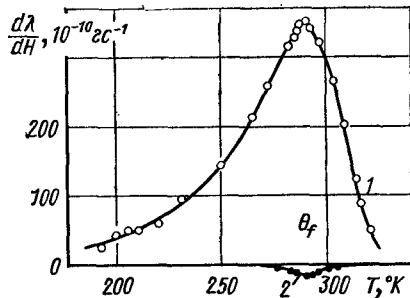


Рис. 28.56. Зависимость $d\lambda/dH$ для монокристалла Gd от температуры [13]:

1 — вдоль оси c ; 2 — вдоль оси a

Рис. 28.58. Зависимость продольной $\lambda_{||}$ (черные кружки) и поперечной $\lambda_{\perp}$ (светлые кружки) магнитострикции поликристаллического Tb при различных значениях напряженности магнитного поля от температуры [13]

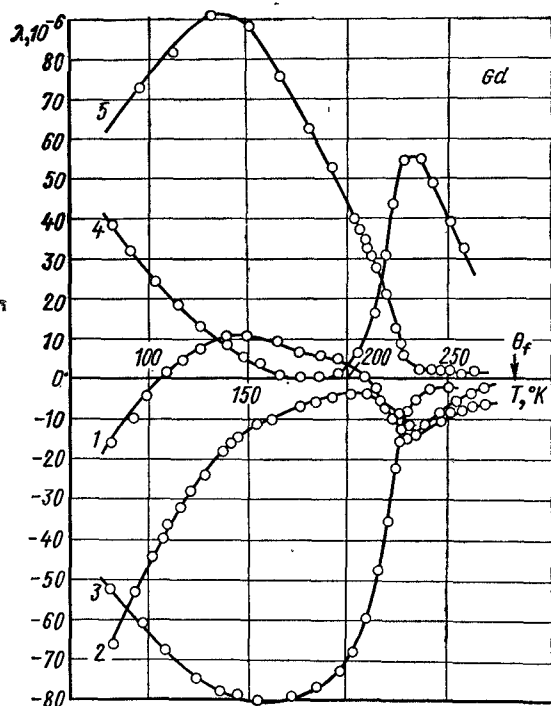
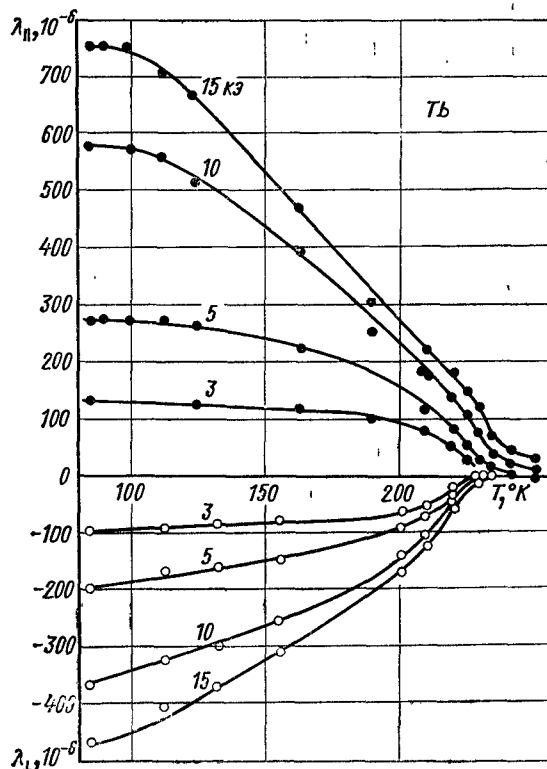


Рис. 28.57. Зависимость константы магнитострикции насыщения λ_s Gd от температуры [13]:

1 — $H \parallel \lambda_{||} a$; 2 — $H \parallel b$, $\lambda_{||} a$; 3 — $H \parallel \lambda_{||} c$; 4 — $H \parallel a$, $\lambda_{||} c$; 5 — $H \parallel c$, $\lambda_{||} a$



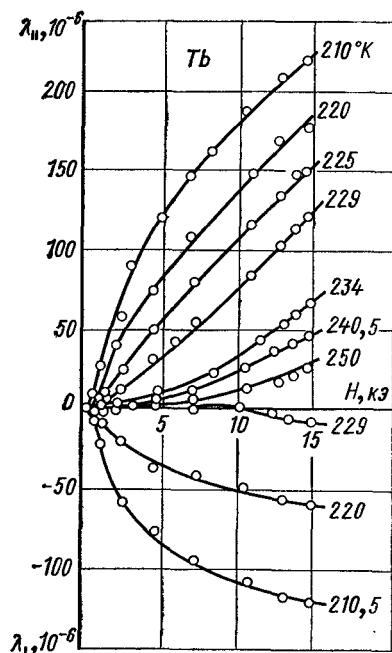


Рис. 28.59. Изотермы продольной $\lambda_{||}$ и поперечной $\lambda_{\perp}$ магнитострикции поликристаллического Tb [13].

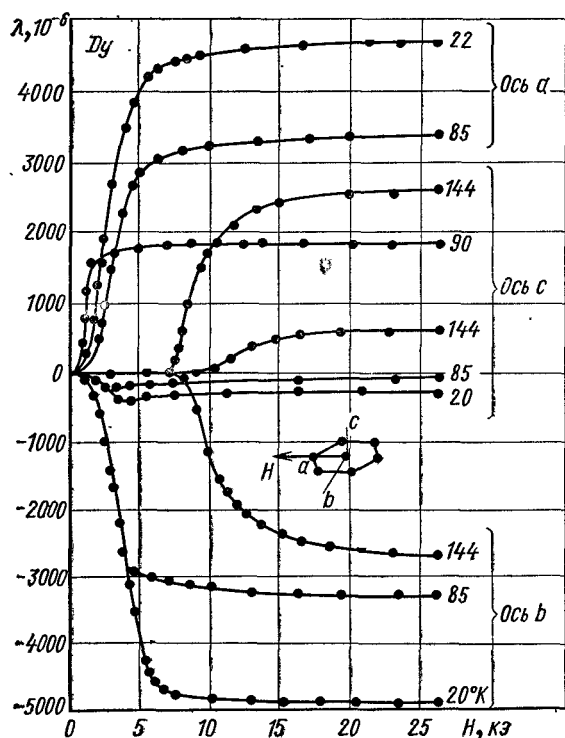


Рис. 28.60. Зависимость магнитострикции в Dy вдоль осей a , b и c от напряженности магнитного поля, приложенного вдоль оси a [13]

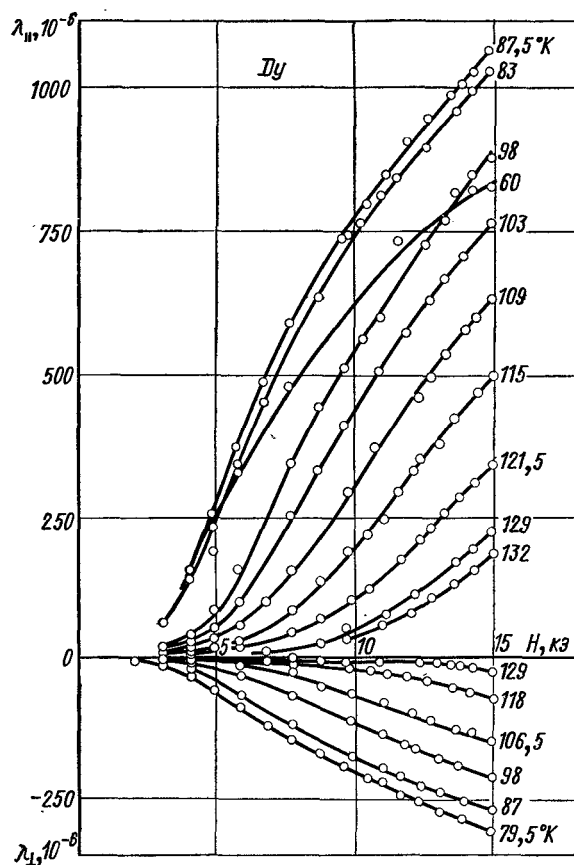


Рис. 28.61. Изотермы продольной $\lambda_{||}$ и поперечной $\lambda_{\perp}$ магнитострикции поликристаллического Dy [13]

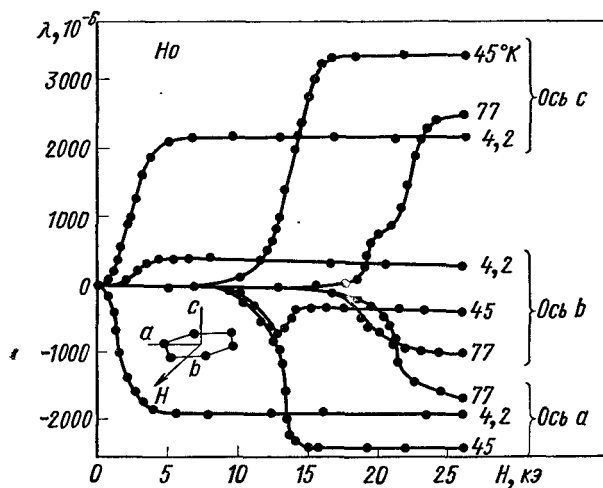


Рис. 28.62. Зависимость магнитострикции монокристалла Ho вдоль осей a , b и c от напряженности магнитного поля, приложенного вдоль оси b , для различных значений температуры T [13]

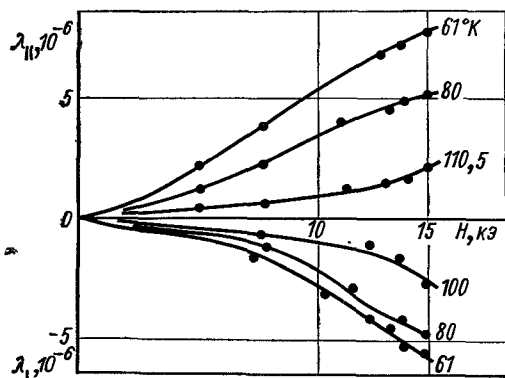


Рис. 28.63. Изотермы продольной $\lambda_{||}$ и поперечной $\lambda_{\perp}$ магнитострикции поликристаллического Ni [13]

Таблица 28.23

Магнитострикция насыщения ферромагнитных сплавов на основе марганца при температуре 20°C [15] (см. также рис. 28.64)

Сплав	Магнитострикция насыщения $(\Delta l/l)_s \cdot 10^{-6}$
31% Mn + 69% Sb	-83
30,9% Cu + 14% Mn + 55,1% Bi	-140

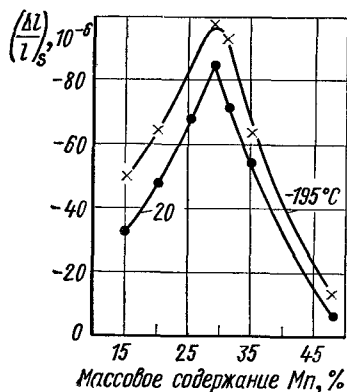


Рис. 28.64. Относительное изменение длины $(\Delta l/l)_s$ сплавов Mn—Sb в зависимости от состава и температуры [15]

Коэффициент размагничивания

При намагничивании эллипсоидальных образцов во внешнем магнитном поле напряженностью H_e напряженность истинного (внутреннего) магнитного поля H в каком-либо сечении образца представляет собой сумму напряженностей H_e и $-\Delta H$ внешнего и размагничивающего полей:

$$H = H_e - \Delta H.$$

В первом приближении напряженность размагничивающего поля ΔH пропорциональна намагниченности образца:

$$\Delta H = NJ = \frac{N}{4\pi} (B - H).$$

Коэффициент пропорциональности N называется коэффициентом размагничивания. Значение коэффициента размагничивания зависит от формы образца. Значения $N/4\pi$ приведены в табл. 28.24 и на рис. 28.65 и 28.66.

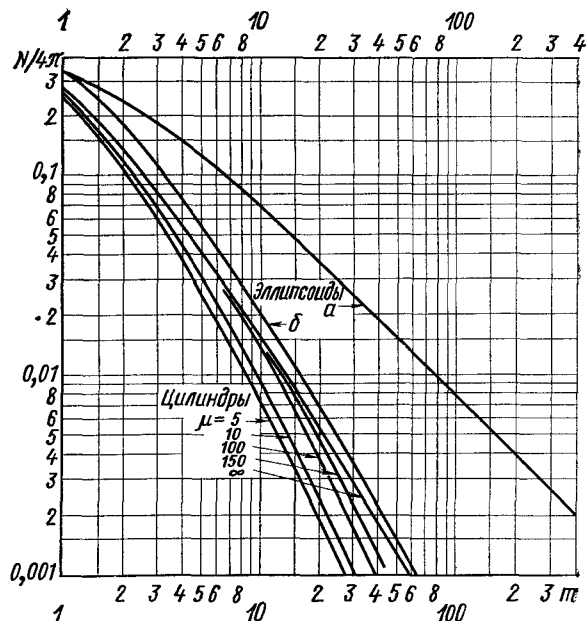


Рис. 28.65. Коэффициент размагничивания эллипсоидов и цилиндров для t , лежащих в интервале от 1 до 400:

а — сжатые эллипсоиды, б — вытянутые эллипсоиды. По оси абсцисс отложено t — отношение длины большой оси к длине малой оси (для эллипсоидов) или длины к диаметру (для цилиндров) [6]

Отношение B/H_e , т. е. отношение индукции в образце к напряженности внешнего магнитного поля называется кажущейся проницаемостью μ' . В тех случаях, когда $1/\mu \ll 1$, для определения истинной проницаемости можно пользоваться следующей формулой:

$$1/\mu = (1/\mu') - (N/4\pi).$$

Связь истинной магнитной проницаемости μ с кажущейся μ' для цилиндров с различным отношением t длины к диаметру показана на рис. 28.67.

В цилиндрическом образце индукция распределена неравномерно: она максимальна в средней части и убывает к концам. Только у образцов, имеющих форму эллипсоидов и находящихся в однородном магнитном поле, индукция однородна по всему объему образца. Коэффициент размагничивания эллипсоидов с заданным отношением длин их трех осей можно точно рассчитать; для них можно определить также направление индукции. Ниже приводятся формулы для основных случаев: 1) вытянутого эллипсоида вращения (овоида), имеющего одну большую полуось, отношение которой к малой

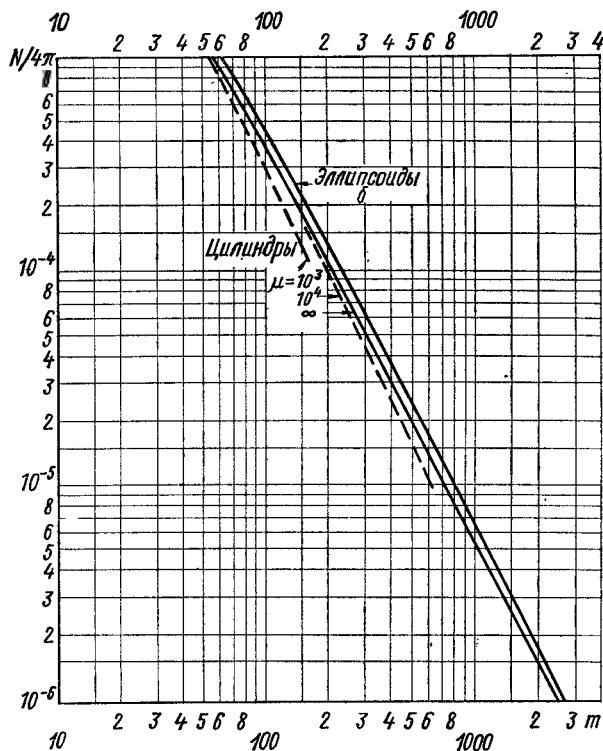


Рис. 28.66. Коэффициент размагничивания эллипсоидов и цилиндров для m , лежащих в интервале от 10 до 4000 (обозначения те же, что и на рис. 28.65) [6]

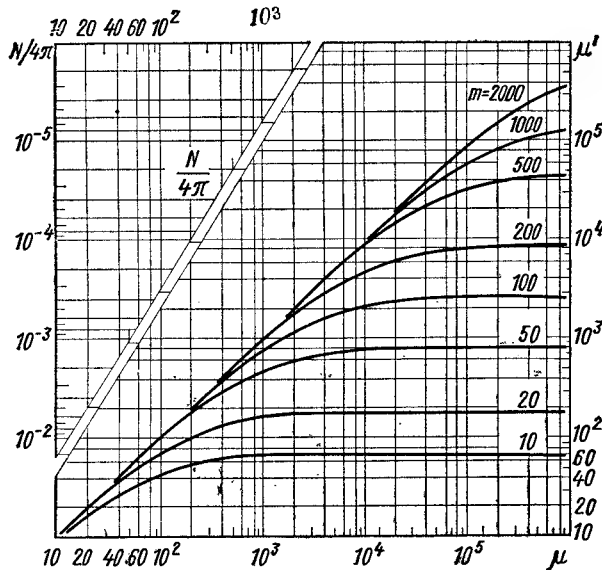


Рис. 28.67. Связь между истинной магнитной проницаемостью μ и кажущейся магнитной проницаемостью μ' для цилиндров с различным отношением длины к диаметру [6]

равно m , и 2) сжатого эллипсоида вращения (сфероида), имеющего одну малую полуось, отношение которой к большой равно $1/m$. В том и другом случае предполагается, что образец намагничивается параллельно большой оси:

$$\frac{N}{4\pi} = \frac{1}{m^2 - 1} \left[\frac{m}{\sqrt{m^2 - 1}} \ln(m + \sqrt{m^2 - 1}) - 1 \right];$$

$$\frac{N}{4\pi} = \frac{1}{2} \left[\frac{m^2}{(m^2 - 1)^{3/2}} \arcsin \frac{\sqrt{m^2 - 1}}{m} - \frac{1}{m^2 - 1} \right].$$

Таблица 28.24

Коэффициент размагничивания $N/4\pi$ для цилиндров и эллипсоидов, намагничиваемых параллельно большой оси [6]

Отношение длины к диаметру m	Цилиндры	Эллипсоиды	
		вытянутые	сжатые
0	1,0	1,0	1,0
1	0,27	0,3333	0,3333
2	0,14	0,1735	0,2364
5	0,040	0,0558	0,1248
10	0,0172	0,0203	0,0696
20	0,00617	0,00675	0,0369
50	0,00129	0,00144	0,01472
100	0,00036	0,000430	0,00776
200	0,000090	0,000125	0,00390
500	0,000014	0,0000236	0,001567
1000	0,0000036	0,0000066	0,000784
2000	0,	0,0000019	0,000392

28.3. ФЕРРОМАГНЕТИКИ, ИМЕЮЩИЕ ВАЖНОЕ ЗНАЧЕНИЕ В ТЕХНИКЕ

Магнитомягкие материалы

Сталь электротехническая нелегированная. Нелегированной электротехнической сталью называют сплавы железа, содержащие менее 0,1% углерода и минимальное количество марганца, кремния и других примесей (табл. 28.25—28.27, рис. 28.68).

Наименование «железо» условно дано низкоуглеродистой стали, полученной с применением электролитического, карбонильного процессов или методом прямого восстановления наиболее чистых руд.

Таблица 28.25

Химический состав железа [16]

Название	Химический состав, % (не более)					
	C	Si	Mn	S	P	Cu
Кипящая низкоуглеродистая электротехническая сталь («Армко»)	0,025	0,05	0,035	0,025	0,015	0,08
Электролитическое железо	0,004	0,004	0,002	0,004	0,003	—
Карбонильное железо	0,01	0,01	0,01	0,005	0,005	—

Таблица 28.26

Магнитные свойства железа [6,16]

Название	$H_c, \text{э}$	μ_a	$\mu_{\text{макс}}$	$B_r, \text{эс}$
Низкоуглеродистая сталь с минимальным содержанием примесей	0,01	—	350 000	—
Электролитическое железо (после переплавки в вакууме и последующего отжига)	0,36	500	15 000	1500
Карбонильное железо	0,08	2000—3000	20 000—21 500	5500—6000

Таблица 28.27

Магнитные свойства электротехнической иелегированной стали (ГОСТ 3836—73)*

Марка**	$H_c, \text{э}$ (не более)	$\mu_{\text{макс}}$ (не менее)
10 895	1,2	3000
20 895		
10 880		
20 880	1,0	4000
10 864		
20 864		
10 848	0,8	4500
20 848		
20 832		
	0,6	4800
	0,4	5000

* Химический состав: $C \leq 0,04\%$; $Si \leq 0,3\%$; $Mn \leq 0,3\%$.

** $B, \text{кэс}$, при напряженностях (в индексе, а/м) не менее: $B_{500} = 13,8$; $B_{1000} = 15,0$; $B_{2500} = 16,2$; $B_{5000} = 17,1$; $B_{10000} = 18,1$; $B_{30000} = 20,5$.

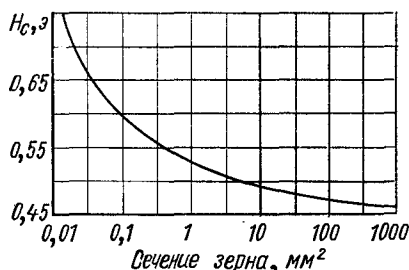


Рис. 28.68. Влияние размера зерна на коэрцитивную силу стали с содержанием углерода 0,02% [16]

Сплавы железа с кремнием. Листовая электротехническая сталь. Сплавы железа, содержащие от 0,8 до 5,00% кремния, изготавливаются в виде листов и лент различных толщин под наименованием *листовой* и *ленточной* электротехнической стали. В СССР в соответствии с ГОСТ 802—58 изготавливаются шесть групп этой стали, отличающихся содержанием кремния и методом изготовления (табл. 28.28).

По степени легирования кремнием, магнитным и электрическим свойствам листовая электротехническая сталь подразделяется на марки. Буквы и цифры в марках условно означают: Э — электротехническая сталь; первая цифра после буквы Э (1, 2, 3, 4) — степень легирования стали кремнием: 1 — слаболегированная сталь, 2 — среднелегированная сталь, 3 — высоколегированная сталь, 4 — высоколегированная сталь; вторая цифра (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) — гарантированные электрические и магнитные свойства стали: 1, 2, 3 — удельные потери при перемагничивании стали с частотой 50 гц и магнитная индукция в сильных полях (1 — с нормальными удельными потерями, 2 — с пониженными, 3 — с низкими), буква А после цифры обозначает особо низкие удельные потери, 4 — удельные потери при перемагничивании стали с частотой 400 гц и магнитная индукция в средних полях, 5, 6 — магнитная проницаемость в слабых полях — от 0,002 до 0,008 а/см (5 — с нормальной магнитной проницаемостью, 6 — с повышенной), 7, 8 — магнитная проницаемость в средних полях от 0,03 до 10 а/см (7 — с нормальной магнитной проницаемостью, 8 — с повышенной);

третья цифра (0) обозначает, что сталь холоднокатаная текстурованная;

третья и четвертая цифры (00) обозначают, что сталь холоднокатаная и малотекстурованная.

Указанные выше обозначения марок относятся к стали нормальной точности проката и нормальной отделки поверхности.

Для стали повышенной точности проката и повышенной отделки поверхности в обозначение марки вводится в конце буква П.

Электротехническая листовая сталь, изготавливаемая отечественной промышленностью, согласно ГОСТ 802—58, должна обладать магнитными свойствами, указанными в табл. 28.29—28.32.

Условные индексы: $B_{0,002}$; $B_{0,004}$; $B_{0,008}$; $B_{0,03}$; $B_{0,06}$; $B_{0,1}$; $B_{0,2}$; $B_{0,5}$; $B_{0,7}$; B_1 ; B_2 ; B_5 ; B_{10} ; B_{25} ; B_{50} ; B_{100} ; B_{300} — обозначают магнитную индукцию в кэс на основной коммутационной кривой намагничивания при напряженности магнитного поля в амперах на 1 см (а/см), равной соответствующей цифре при букве В (0,002, 0,004 и т. д.);

$P_{10/50}$, $P_{15/50}$, $P_{17/50}$ обозначают полные удельные потери в ваттах на 1 кг стали (вт/кг) при перемагничивании ее с частотой 50 гц и максимальных значениях индукции — 10, 15, 17 кэс ; $P_{7,5/400}$, $P_{10/400}$ — полные удельные потери в ваттах на 1 кг стали при перемагничивании ее с частотой 400 гц и максимальных значениях индукции 7,5 и 10 кэс соответственно, отнесенных к синусоидальному изменению индукции.

Потери на гистерезис за цикл определяются площадью петли:

$$W_h = \frac{1}{4\pi} \oint H dB = \oint H dJ.$$

W_h выражается в эрг/см^3 , если B и H выражены соответственно в гауссах и эрстедах. Потери на гистерезис P измеряют также в вт/кг , относя их к определенной частоте переменного магнитного поля f . Связь между P в этих единицах и в эрг/см^3 за цикл имеет вид

Таблица 28.28

Содержание кремния в листовой электротехнической стали (ГОСТ 802—58)

Сталь	Содержание кремния, %
Слаболегированная:	
а) горячекатаная	0,8—1,8
б) холоднокатаная	1,0—1,8
Среднелегированная	1,8—2,8
Повышеннолегированная:	
а) горячекатаная	2,8—3,8
б) холоднокатаная	2,8—3,5
Высоколегированная	3,8—4,8

$$P \text{ (вт/кг)} = \frac{10^{-4} f \cdot W_h}{d},$$

где d — плотность, г/см³

Согласно ГОСТ 802—58, удельные потери стали после старения не должны превышать потерь, указанных в табл. 28.29 и 28.30, на следующие значения:

высоколегированная сталь	3%
средне- и повышеннолегированная сталь	6%
слаболегированная сталь марок Э11, Э1100	7%
слаболегированная сталь марок Э12, Э13, Э1200, Э1300	9%

Таблица 28.29

Магнитная индукция и удельные потери при высокой напряженности поля и частоте 50 гц (ГОСТ 802—58)

Марка стали	Номинальная толщина, мм	Магнитная индукция (не менее), кГс, при напряженности магнитного поля (А/см)					Удельные потери (не более), Вт/кг, при индукции и частоте (кГс/ц)		
		B ₁₀	B ₂₅	B ₅₀	B ₁₀₀	B ₃₀₀	P _{10/50}	P _{15/50}	P _{17/50}

Горячекатаная сталь

Э11	1,0	—	15,3	16,3	17,6	20,0	5,8	13,4	—
Э12	1,0	—	15,0	16,2	17,5	19,8	5,5	12,5	—
Э11	0,5	—	15,3	16,4	17,6	20,0	3,3	7,7	—
Э12	0,5	—	15,0	16,2	17,5	19,8	3,2	7,5	—
Э13	0,5	—	15,0	16,2	17,5	19,8	2,8	6,5	—
Э21	0,5	—	14,8	15,9	17,3	19,5	2,5	6,1	—
Э22	0,5	—	14,8	15,9	17,3	19,5	2,2	5,3	—
Э31	0,5	—	14,6	15,7	17,2	19,4	2,0	4,4	—
Э32	0,5	—	14,6	15,7	17,1	19,2	1,8	3,9	—
Э31	0,35	—	14,6	15,7	17,1	19,2	1,6	3,6	—
Э32	0,35	—	14,6	15,7	17,1	19,2	1,4	3,2	—
Э41	0,5	13,0	14,6	15,7	17,0	19,0	1,55	3,5	—
Э42	0,5	12,9	14,5	15,6	16,9	18,9	1,4	3,1	—
Э43	0,5	12,9	14,4	15,5	16,9	18,9	1,25	2,9	—
Э43А	0,5	12,9	14,4	15,5	16,9	18,9	1,15	2,7	—
Э41	0,35	13,0	14,6	15,7	17,0	19,0	1,35	3,0	—
Э42	0,35	12,9	14,5	15,6	16,9	18,9	1,2	2,8	—
Э43	0,35	12,9	14,4	15,5	16,9	18,9	1,05	2,5	—
Э43А	0,35	12,9	14,4	15,5	16,9	18,9	0,9	2,2	—

Продолжение табл. 28.29

Марка стали	Номинальная толщина, мм	Магнитная индукция, (не менее), кГс при напряженности магнитного поля (А/см)					Удельные потери (не более), Вт/кг, при индукции и частоте (кГс/ц)		
		B ₁₀	B ₂₅	B ₅₀	B ₁₀₀	B ₃₀₀	P _{10/50}	P _{15/50}	P _{17/50}

Холоднокатаная малотекстурованная сталь

Э1100	0,5	—	15,3	16,4	17,6	20,0	3,3	7,5	—
Э1200	0,5	—	15,3	16,4	17,6	20,0	2,8	6,5	—
Э1300	0,5	—	15,5	16,4	17,6	20,0	2,5	5,8	—
Э3100	0,5	—	15,0	16,0	17,3	19,6	1,7	3,7	—
Э3200	0,5	—	14,8	15,8	17,2	19,5	1,5	3,4	—

Холоднокатаная текстурованная сталь

Э310	0,50	16,0	17,5	18,3	19,1	19,8	1,1	2,45	3,2
Э320	0,50	16,5	18,0	18,7	19,2	20,0	0,95	2,1	2,8
Э330	0,50	17,0	18,5	19,0	19,5	20,0	0,8	1,75	2,5
Э310	0,35	16,0	17,5	18,3	19,1	19,8	0,8	1,75	2,5
Э320	0,35	16,5	18,0	18,7	19,2	20,0	0,7	1,5	2,2
Э330	0,35	17,0	18,5	19,0	19,5	20,0	0,6	1,3	1,9
Э330А	0,35	17,0	18,5	19,0	19,5	20,0	0,5	1,1	1,6

Примечания. 1. Свойства горячекатаной и малотекстурованной холоднокатаной стали указаны для проб, не подвергавшихся после нарезки отжигу. Свойства текстурованной холоднокатаной стали указаны для проб, подвергнутых после нарезки отжигу для снятия наклепа.

2. Для малотекстурованной холоднокатаной стали разница в значениях магнитной индукции B_{25} вдоль и поперек листа не должна превышать для марок Э1100, Э1200, Э1300—1,30 кГс, а для марок Э3100, Э3200—1,6 кГс.

Таблица 28.30

Магнитная индукция и удельные потери при частоте 400 гц (ГОСТ 802—58)

Марка стали	Толщина листа, мм	Магнитная индукция, кГс (не менее)			Удельные потери, Вт/кг (не более)	
		B ₅	B ₁₀	B ₂₅	P _{7,5/400}	P _{10/400}
Э44	0,35	12,1	13,0	14,4	10,7	19,0
Э44	0,20	12,0	12,9	14,2	7,2	12,5
Э44	0,10	11,9	12,8	14,0	6,0	10,5
Э340	0,20	15,0	16,0	17,0	7,0	12,0

Таблица 28.31

Магнитная индукция листовой электротехнической стали при малой напряженности магнитного поля (ГОСТ 802—58)

Марка стали	Толщина листа, мм	Магнитная индукция, Гс (не менее) при напряженности магнитного поля (А/см)		
		B _{0,002}	B _{0,004}	B _{0,008}
Э45	0,35	1,2	2,6	7,7
Э46	0,35	1,5	3,3	8,8
Э45	0,20	1,3	2,8	7,0
Э46	0,20	1,6	3,5	8,8

Таблица 28.32

Магнитная индукция при средней напряженности поля (ГОСТ 802—58)

Марка стали	Толщина листа, мм	Магнитная индукция, кес (не менее), при напряженности поля (а/см)									
		B _{0,03}	B _{0,05}	B _{0,1}	B _{0,2}	B _{0,5}	B _{0,7}	B ₁	B ₂	B ₅	B ₁₀
Э47	0,35	—	—	0,35	1,4	4,8	6,1	7,7	9,2	12,1	13,0
Э48	0,35	—	—	0,45	1,7	5,7	7,1	8,7	10,2	12,5	13,0
Э47	0,20	—	—	0,3	1,0	3,8	5,8	6,6	9,0	11,8	12,9
Э48	0,20	—	—	0,4	1,4	4,8	6,2	7,4	9,2	12,0	12,9
Э370	0,50	0,14	0,4	2,5	8,0	12,0	13,0	14,5	15,5	16,5	17,0
Э380	0,50	0,2	0,55	4,2	10,2	13,8	14,7	15,2	15,8	16,7	17,0
Э370	0,35	0,12	0,25	2,0	7,0	11,0	12,0	13,5	14,5	16,0	17,0
Э380	0,35	0,18	0,45	4,0	10,0	13,5	14,5	15,0	15,5	16,5	17,0
Э370	0,20	0,1	0,2	1,4	5,0	9,0	10,4	11,6	14,2	15,7	16,7
Э380	0,20	0,18	0,45	2,0	7,0	11,0	12,0	13,5	14,5	16,0	17,0

Магнитные характеристики сталей различных марок (рис. 28.69—28.72)

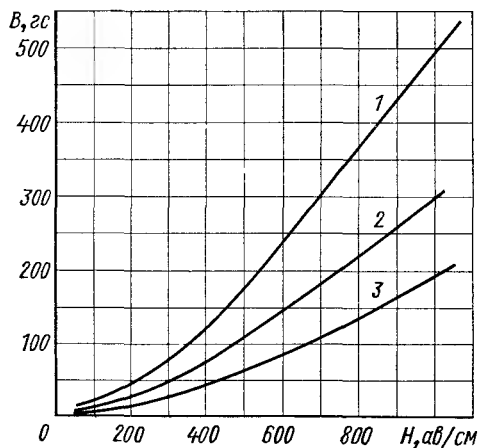


Рис. 28.69. Кривые намагничивания сталей некоторых марок при постоянном токе: 1 — Э45 (ВП-2); 2 — Э42(Э4АА); 3 — Э41 (Э4А) [16]

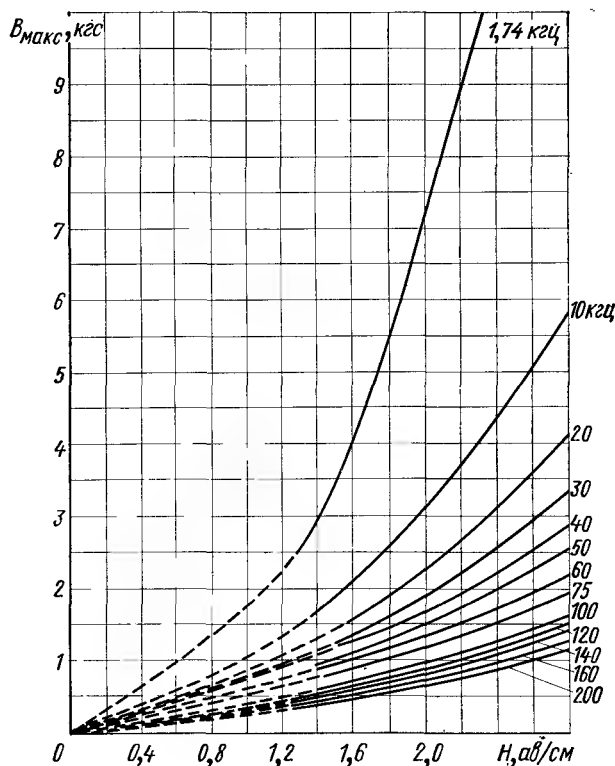


Рис. 28.70. Кривые намагничивания трансформаторной стали с содержанием 4% Si при частотах до 200 кГц [16]

Для повышенных и высоких частот разработана и освоена горячекатаная тонколистовая сталь марки ВПТ (высокая проницаемость, тонкая). Эта сталь (не вошедшая в ГОСТ) изготавливается толщиной 0,1—0,2 мм. При частоте 50 гц сталь ВПТ имеет потери: $P_{10} = 1,0$ вт/кг, $P_{15} = 2,5$ вт/кг, а при частоте 400 гц: $P_{15} = 6,5$ вт/кг (рис. 28.73).

Магнитные свойства стали ВПТ в слабых полях показаны на рис. 28.73, 28.74.

На рис. 28.75 показано влияние углерода и кремния на гистерезисные потери электротехнической стали. При содержании в стали 5—6% кремния, углерода в

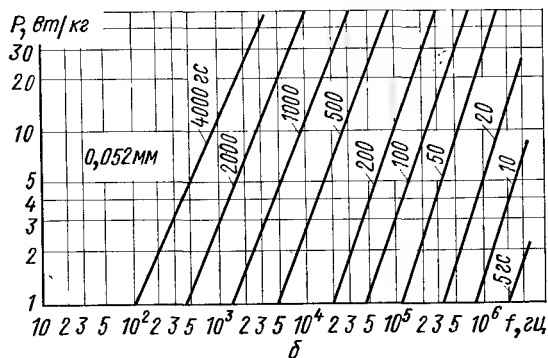
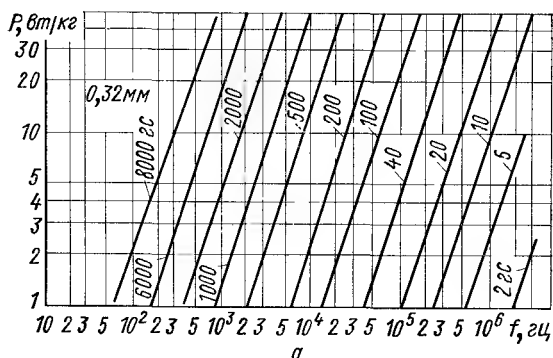


Рис. 28.71. Потери в трансформаторной стали толщиной листа 0,32 (а) и 0,052 мм (б) при различных частотах и индукциях [16]

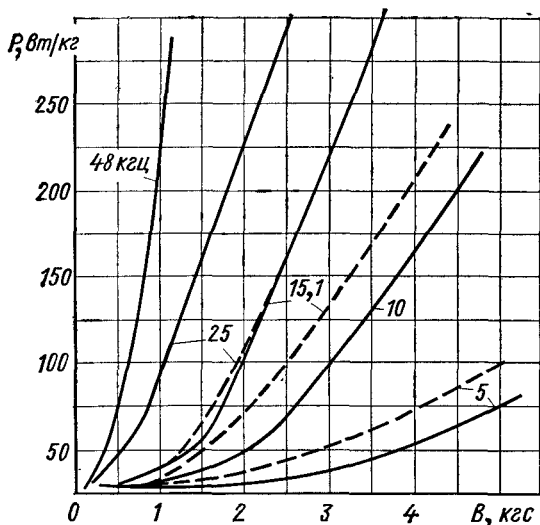


Рис. 28.72. Потери в трансформаторной стали толщиной листа 0,35 мм при различных частотах: изменение потерь на гистерезис (пунктирные линии) и вихревые токи (сплошные линии) [16]

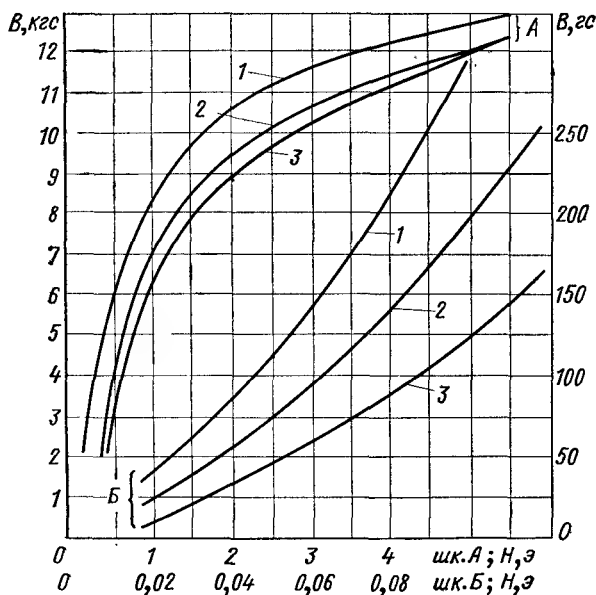


Рис. 28.73. Магнитные свойства стали ВПТ в слабых полях [16]:

1 — толщина 0,2 мм после высокотемпературного отжига; 2 — толщина 0,1 мм после высокотемпературного отжига; 3 — толщина 0,2 мм после обычного отжига. Содержание Si=4,4±4,0%

виде карбидов остается всего около 0,008% и он уже не оказывает существенного влияния.

Другие примеси в электротехнической стали оказывают меньшее влияние на ее магнитные свойства, чем углерод (рис. 28.76).

Альсиферы. Сплавы железа с более высоким содержанием кремния (до 9%) и сплавы, легированные алюминием (до 7%), выпускают в виде литых магнитных

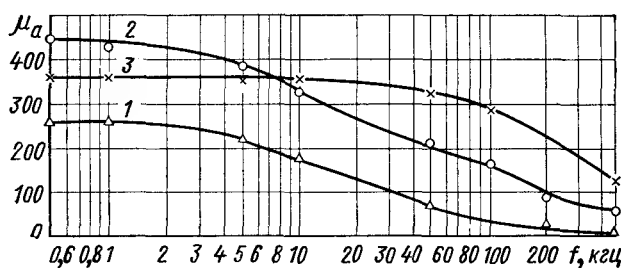


Рис. 28.74. Зависимость начальной магнитной проницаемости стали марок Э41 и ВПТ в поле $H \sim 0,01$ э от частоты [16]:

1 — Э41 толщиной листа 0,35 мм; 2 — ВПТ толщиной листа 0,1 мм; 3 — ВПТ толщиной листа 0,35 мм

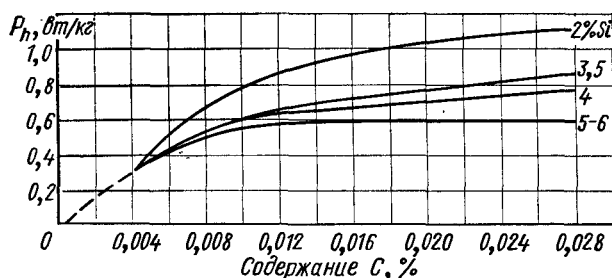


Рис. 28.75. Гистерезисные потери в электротехнической стали в зависимости от содержания углерода и кремния [16]

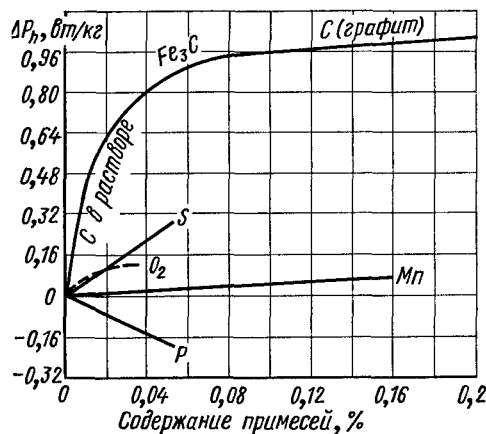


Рис. 28.76. Влияние примесей на гистерезисные потери электротехнической стали с 4% кремния при $B = 10$ кГс. По оси ординат отложено приращение потерь по сравнению с потерями в электротехнической стали, содержащей только 4% Si [16]

элементов или в виде порошков. Эти сплавы называют альсиферами. Альсиферы представляют собой твердые растворы алюминия, кремния и железа; обладают большой твердостью (твердость по шкале Роквелла 45—50) и большой хрупкостью.

Из приведенной диаграммы на рис. 28.77 видно, что наиболее высокое значение магнитной проницаемости альсифер имеет в очень узком интервале содержания в сплаве кремния и алюминия. Сплав оптимального состава содержит 9,6% кремния и 5,4% алюминия.

Таблица 28.33

Магнитные свойства альсифера оптимального состава [16]

μ_a	$\mu_{\text{макс}}$	P_h , вт/кг	B_r , кгс	H_c , э	$4\pi J_s$, кгс
35 100	117 000	0,022	3,35	0,022	11

(Магнитострикция и константа анизотропии сплавов железо — кремний — алюминий при оптимальном составе близки к нулю.)

Рис. 28.77. Начальная магнитная проницаемость альсифера в зависимости от содержания Si и Al [16]



Железоникелевые сплавы с высокой магнитной проницаемостью. Химический состав и магнитные свойства железоникелевых сплавов

Таблица 28.34a

Химический состав и точка Кюри железоникелевых сплавов (ГОСТ 10160—62, ГОСТ 10994—74)

Марка сплава	Содержание, % (остальное — железо)							
	Ni	Si	Cr	Mo	Mn	Co	Cu	θ_f , °C
45Н	45,0—46,5	0,15—0,30	—	—	0,60—1,10	—	—	440
50Н	49,0—50,5	0,15—0,30	—	—	0,30—0,60	—	—	500
50НП	49,0—50,5	0,15—0,30	—	—	0,30—0,60	—	—	500
65НП	64,5—66,0	0,15—0,30	—	—	0,30—0,60	—	—	600
34НКМП	33,5—35,0	0,15—0,30	—	2,80—3,20	0,30—0,60	28,5—30,0	—	—
50НХС	49,5—51,0	1,10—1,40	3,80—4,20	—	0,60—1,10	—	—	360
79НМ	78,5—80,0	0,30—0,50	—	3,8—4,1	0,60—1,10	—	—	450
80НХС	79,0—81,0	1,10—1,50	2,60—3,00	—	0,60—1,10	—	—	330
76НХД	75,0—76,5	0,15—0,30	1,80—2,20	—	0,30—0,60	—	4,80—5,20	430

Таблица 28.34б

Магнитные свойства железоникелевых сплавов с высокой начальной проницаемостью (ГОСТ 10160—62)

Марка сплава	Толщина ленты, мм	μ_a	$\mu_{\text{макс}}$	H_c , э	B_s , кгс
		(не менее)		(не более)	(не менее)
45Н	0,35—2,50	2 800	25 000	0,20	15
	0,20—0,30	2 500	23 000	0,25	
	0,10—0,18	2 000	20 000	0,30	
	0,05—0,08	1 800	18 000	0,30	
	0,02—0,04	1 700	16 000	0,40	
50Н	1,1—2,5	2800	25 000	0,16	15
	0,55—1,00	3000	30 000	0,15	
	0,35—0,50	3000	35 000	0,12	
	0,20—0,30	2600	30 000	0,15	
	0,10—0,18	2300	25 000	0,20	
	0,05—0,08	2000	20 000	0,25	
	0,02—0,04	1800	20 000	0,30	
50НП*	0,05	500—1000	35 000	0,23	15 $B_r/B_s \geq 85\%$ $H = 10$ э
	0,02	500—1000	35 000	0,25	

Марка сплава	Толщина ленты, мм	μ_a	$\mu_{\max}$	$H_c, \text{э}$	$B_s, \text{кгс}$
		(не менее)		(не более)	(не менее)
65НП*	0,35—0,50	500—2000	300 000	0,03	$\left. \begin{array}{l} 13 \\ B_r/B_s \geq 90\% \\ \text{при } H = 10 \text{ э} \end{array} \right\}$
	0,20—0,30	500—2000	250 000	0,03	
	0,10—0,18	500—2000	200 000	0,035	
	0,05—0,08	500—2000	100 000	0,04	
	0,02—0,04	300—1500	70 000	0,08	
50НХС	0,55—1,0	3000	20 000	0,12	$\left. \begin{array}{l} 10 \end{array} \right\}$
	0,35—0,50	3200	30 000	0,10	
	0,20—0,30	3000	28 000	0,12	
	0,10—0,18	2500	25 000	0,16	
	0,05—0,08	2000	20 000	0,20	
	0,02—0,04	1500	15 000	0,25	
79НМ	1,1—2,5	22 000	130 000	0,02	$\left. \begin{array}{l} 7,5 \end{array} \right\}$
	0,35—1,00	25 000	150 000	0,02	
	0,20—0,30	22 000	130 000	0,02	
	0,10—0,18	20 000	120 000	0,03	
	0,05—0,08	16 000	90 000	0,04	
	0,02—0,04	16 000	70 000	0,05	
80НХС	1,10—2,50	25 000	150 000	0,015	$\left. \begin{array}{l} 6,5 \end{array} \right\}$
	0,55—1,0	30 000	170 000	0,012	
	0,35—0,50	35 000	150 000	0,015	
	0,20—0,30	28 000	130 000	0,02	
	0,10—0,18	22 000	120 000	0,03	
	0,05—0,08	20 000	90 000	0,04	
	0,02—0,04	18 000	70 000	0,05	

* Проницаемость факультативна.

На рис. 28.78 и 28.79 представлены кривые намагничивания для сплавов тех же марок.

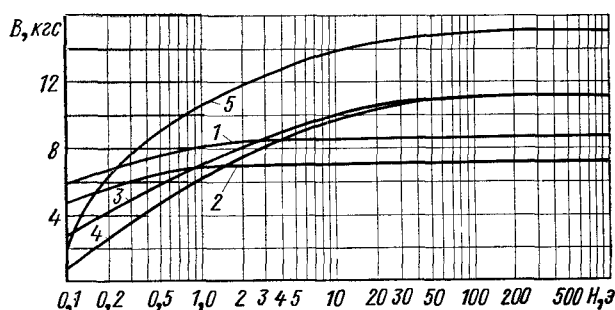
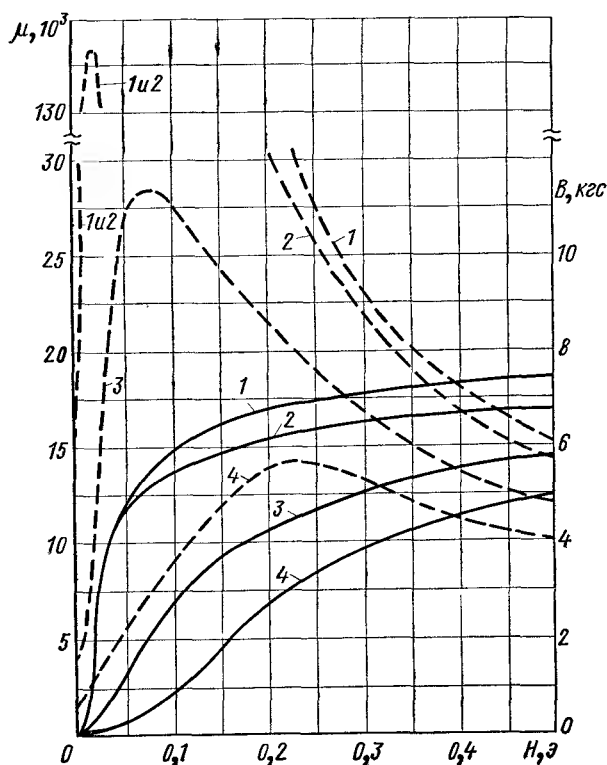


Рис. 28.79. Кривые намагничивания промышленных сплавов Fe — Ni в сильных полях [16]:

1 — сплав 79НМ; 2 — сплав 80НХС; 3 — сплав 50НХС; для 1—3,5 толщина ленты от 0,35 до 0,1 мм; 4 — сплав 50НХС, толщина ленты 0,05 мм; 5 — сплав 50Н

Рис. 28.78. Кривые намагничивания (сплошные) и магнитной проницаемости (пунктирные) в слабых полях для промышленных сплавов Fe — Ni в лентах различной толщины [16]:

1 — сплав 79НМ; 2 — сплав 80НХС; 3 — сплав 50НХС; 1—3 — толщина ленты от 0,35 до 0,1 мм; 4 — сплав 50НХС, толщина ленты 0,05 мм

Свойства промышленных железоникелевых сплавов в переменных полях

Зависимость эффективной проницаемости и тангенса угла потерь на вихревые токи ферромагнитного материала от частоты при напряженности поля H_a , близкой к нулю, обычно учитывается следующими уравнениями:

$$\mu_{f\Phi} = \frac{\mu_a}{p} \frac{\operatorname{sh} p + \sin p}{\operatorname{ch} p + \cos p} \quad (28.14)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{sh} p - \sin p}{\operatorname{sh} p + \sin p}, \quad (28.15)$$

где $p = 2\pi d \sqrt{\mu_a f / \rho \cdot 10^9}$; d — толщина пластин сердечника, см; μ_a — начальная проницаемость; f — частота, гц; ρ — удельное сопротивление материала сердечника, ом·см.

Выражения (28.14) и (28.15) относятся к материалу с однородной структурой и не учитывают влияния потерь на последствие. Поэтому $\mu_{f\Phi}$ и $\operatorname{tg} \delta$, вычисленные по формулам (28.14) и (28.15) при значениях $p \gg 1$, существенно отличаются от наблюдаемых на практике (рис. 28.80—28.83).

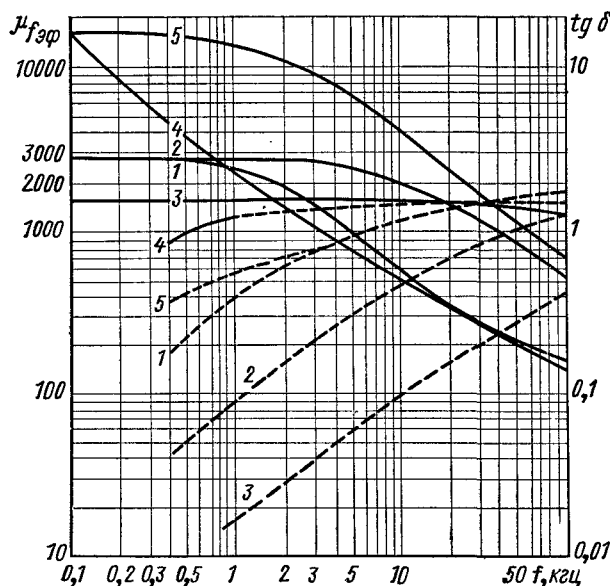


Рис. 28.80. Зависимость эффективной магнитной проницаемости (сплошные линии) и тангенса угла потерь (пунктирные) от частоты при напряженности переменного поля, близкой к нулю [16]:

1 — сплав 50НХС, толщина ленты 0,35 мм; 2 — сплав 50НХС, толщина ленты 0,1 мм; 3 — сплав 50НХС, толщина ленты 0,05 мм; 4 — сплав 79НМ, толщина ленты 0,35 мм; 5 — сплав 79НМ, толщина ленты 0,10 мм

Наиболее резкое падение обратимой магнитной проницаемости при низкой частоте наблюдается для сплава 79НМ — 0,10 мм; при частотах порядка 10 кГц и выше размагничивающее действие вихревых токов приводит к менее резкому изменению μ , при изменении напряженности поля, причем различие между сплавами 79НМ и 50НХС становится незначительным.

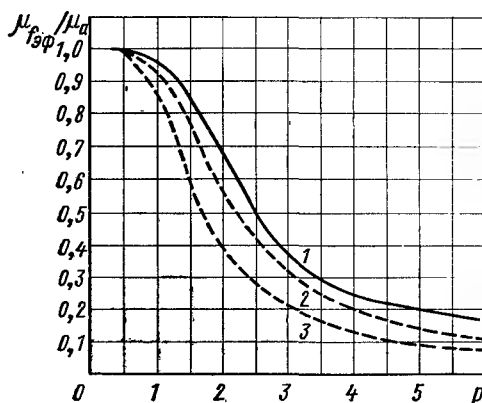


Рис. 28.81. Зависимость относительной магнитной проницаемости $\mu_{f\Phi}/\mu_a$ от параметра p при напряженности магнитного поля H_a , близкой к нулю [см. формулы (28.14) и (28.15)] [16]:

1 — расчетная кривая. Экспериментальные кривые: 2 — для сплавов 50НХС с толщиной ленты 0,35 мм и 79НМ — 0,10 мм; 3 — для сплавов 50НХС — 0,10 мм и 79НМ — 0,35 мм

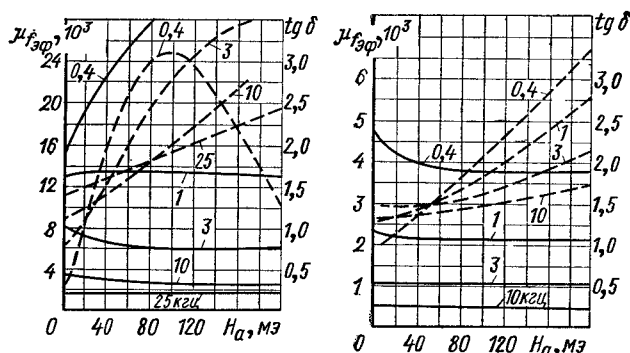


Рис. 28.82. Зависимость эффективной магнитной проницаемости (сплошные линии) и тангенса угла потерь (пунктирные) от напряженности переменного поля для сплава 79НМ в лентах толщиной 0,10 и 0,35 мм при различных частотах [16]

Листовые железоникелевые сплавы в большинстве случаев применяются не в виде тороидов, а в виде Ш-образных сердечников. При сборке сердечников из Ш-образных пластин с просечкой среднего языка приблизительно на 0,5—1 мм внахлестку и при толщине изоляционного слоя на пластинах порядка 5—7 мкм характеристики Ш-образных сердечников на частотах выше 500—1000 гц можно считать идентичными приведенным выше характеристикам тороидальных сердечников (см. рис. 28.80, 28.82—28.84).

При сборке Ш-образных сердечников с зазором эффективная магнитная проницаемость их резко падает, одновременно уменьшаются значение тангенса угла потерь, его зависимость от напряженности поля и влияния подмагничивающего поля на обратимую магнитную проницаемость.

Эффективная магнитная проницаемость и тангенс угла потерь для Ш-образных сердечников с зазором, собранных из пластины сплавов 79НМ и 50НХС [16]

Марка сплава	Толщина пластины, мм	Тип пластины	Зазор, мм	ν_a	Частота, кГц	$\mu_{f\text{эф}}$ при H_a , э		$\text{tg } \delta_{\text{эф}}$ при H_a , э		μ_r при $H=5$ э
						0	0,1	0	0,1	
79НМ	0,35	ШП-20	0,5	470	1	470	—	—	—	—
					10	370	380	0,29	0,30	330
					100	180	180	0,59	0,61	170
50НХС	0,35	ШП-20	0,5	450	1	450	—	—	—	—
					10	330	340	0,25	0,26	320
					100	160	160	0,59	0,62	158
50НХС	0,1	ШП-20	0,8	450	1	450	—	—	—	—
					10	440	460	0,07	0,10	420
					100	330	340	0,38	0,39	320

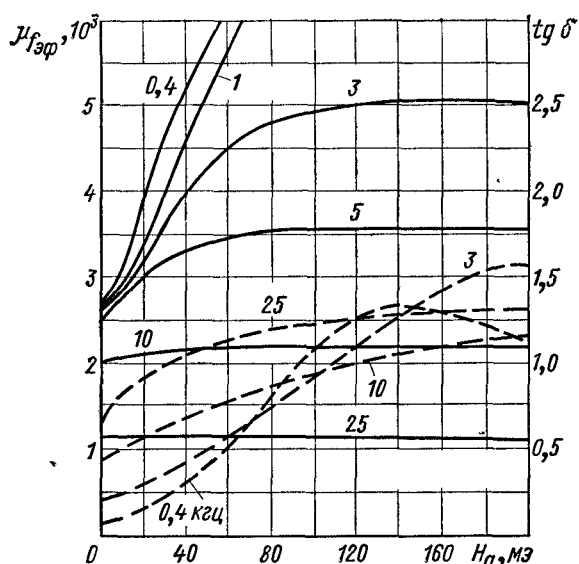


Рис. 28.83. Зависимость эффективной магнитной проницаемости (сплошные линии) и тангенса угла потерь (пунктирные) от напряженности переменного поля для сплава 50НХС в лентах толщиной 0,10 мм [16]

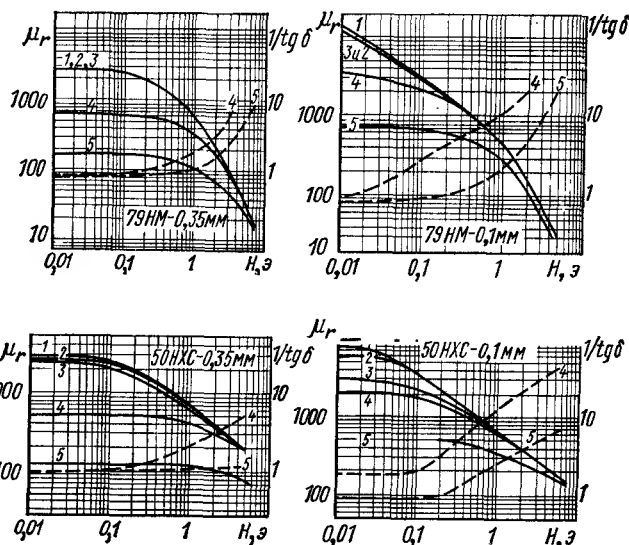


Рис. 28.84. Зависимость обратимой проницаемости (сплошные линии) и $1/\text{tg } \delta$ (пунктирные) для сплавов 79НМ и 50НХС в лентах толщиной 0,35 и 0,1 мм от напряженности подмагничивающего поля [16]:

1 — $f = 1$ кГц, $H_a = 100$ мэ; 2 — $f = 1$ кГц, $H_a = 50$ мэ; 3 — $f = 1$ кГц, $H_a = 5$ мэ; 4 — $f = 10$ кГц, $H_a = 5$ мэ; 5 — $f = 100$ кГц, $H_a = 5$ мэ

Магнитомягкие металлы и сплавы со специальными магнитными свойствами

К магнитомягким металлам и сплавам со специальными магнитными свойствами относят: а) железокобальтовые сплавы, обладающие высокой индукцией насыще-

ния (рис. 28.85, 28.86); б) железоникелькобальтовые сплавы, особенностью которых является постоянство магнитной проницаемости в полях до 1—2 э; в) термомагнитные сплавы с резко изменяющейся проницаемостью в зависимости от температуры; г) так называемые магнитострикционные металлы и сплавы.

Сплавы железа с кобальтом с высокой индукцией насыщения.

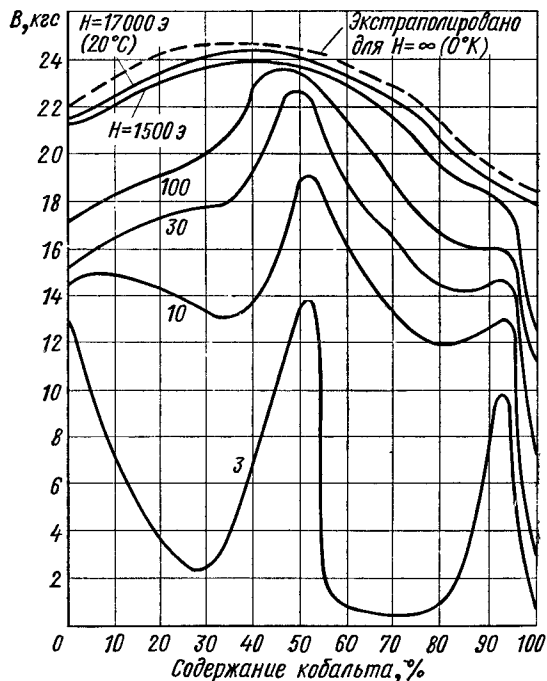


Рис. 28.85. Магнитная индукция сплавов Fe — Co в зависимости от содержания Co и напряженности поля [16]

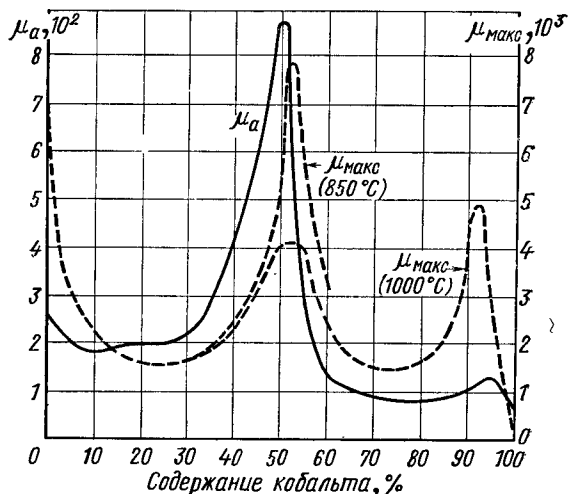


Рис. 28.86. Начальная и максимальная магнитные проницаемости сплавов Fe — Co в зависимости от содержания кобальта и температуры отжига [16]

Пермендюр — железокобальтовый сплав, легированный 2% ванадия (рис. 28.87 и 28.88).

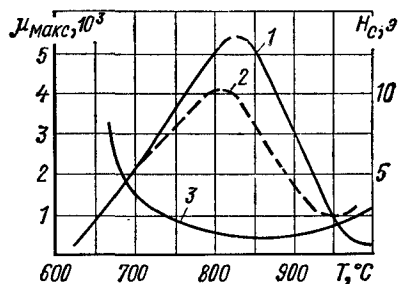


Рис. 28.87. Влияние температуры отжига на магнитные свойства пермендюра с 2% V [16]:

1 — максимальная магнитная проницаемость после быстрого охлаждения; 2 — максимальная магнитная проницаемость после медленного охлаждения; 3 — коэрцитивная сила после быстрого охлаждения

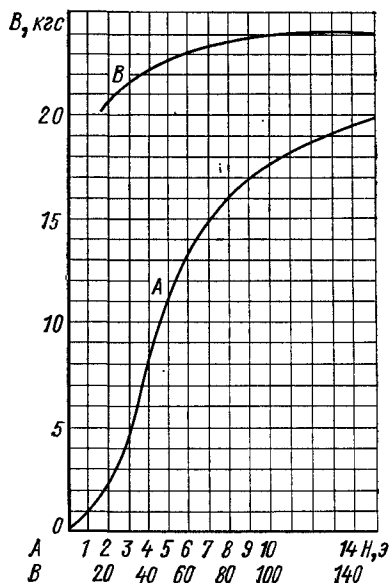


Рис. 28.88. Кривая намагничивания пермендюра с 1,8% V [16]

Сплавы с повышенным постоянством магнитной проницаемости в слабых полях. Сталь электротехническая. На рис. 24.89 представлено изменение начальной магнитной проницаемости электротехнической стали с содержанием 3,25% кремния в зависимости от температуры отжига и напряженности поля.

Высоким постоянством μ_a в слабых полях обладают некоторые сплавы системы железо — никель — кобальт, получившие название перминвары. Содержание основных элементов в перминваре может варьироваться в широких пределах, но обычно он содержит 30% Fe, 45% Ni и 25% Co (перминвар 45—25). Данные по магнитным свойствам сплавов типа перминвар приведены на рис. 28.90 — 28.94 и в табл. 28.36. (См. также ГОСТ 10994—74).

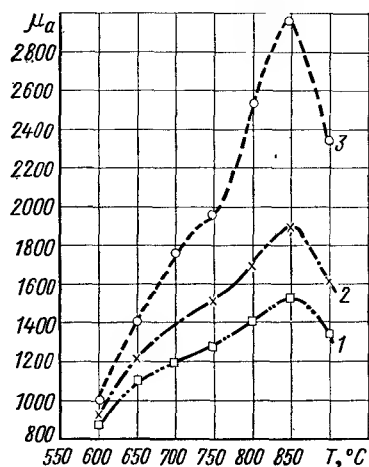


Рис. 28.89. Магнитная проницаемость электротехнической стали с содержанием 3,25% Si в зависимости от температуры отжига [16]:
1 — при напряженности поля 0,01 мВ; 2 — то же при 20 мВ; 3 — то же при 100 мВ

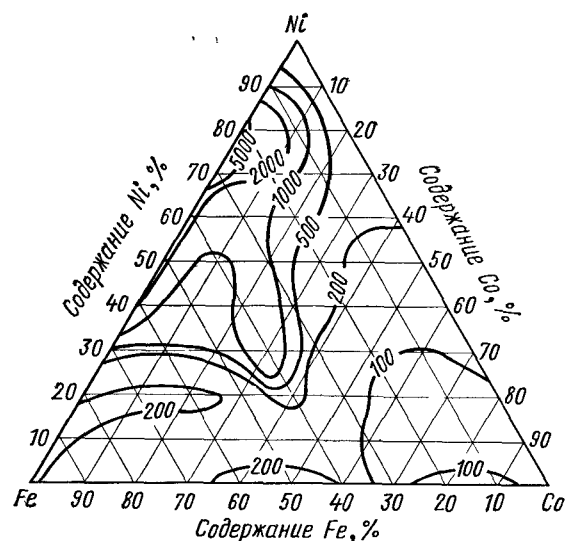


Рис. 28.91. Начальная магнитная проницаемость сплавов Fe — Ni — Co после отжига при 1000° С, охлаждения с печью до 600° С, а затем на воздухе [16]

После низкотемпературного длительного отжига перминвара 45—25 увеличение напряженности поля от 0 до 2 э приводит к изменению его магнитной проницаемости примерно на 1%. Потери на гистерезис для индукции 500 гс составляют около $8 \cdot 10^{-6}$ Вт/кг [16].

Чрезвычайно эффективна термическая обработка перминвара в магнитном поле. Она значительно повышает магнитную проницаемость сплава и несколько снижает его коэрцитивную силу (рис. 28.94). Магнитное

Таблица 28.36

Максимальная магнитная проницаемость сплавов типа перминвар [16]

Химический состав, %			μ _{макс}		T _{зак} , °С
Fe	Co	Ni	Отжиг при 1000°С, охлаждение с печью	Закалка на воздухе	
30	15	55	2800	12 400	700
30	20	50	2400	19 500	725
25	20	55	2500	18 200	725
30	25	45	2000	25 000	725
35	20	45	4200	22 300	700
35	25	40	2400	25 800	715
35	30	35	2000	13 800	725

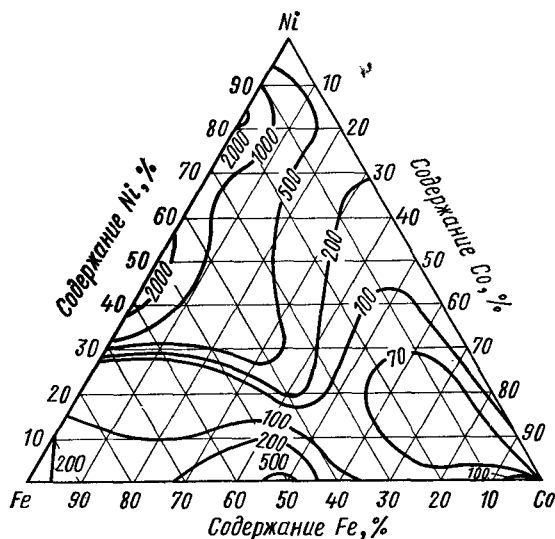


Рис. 28.90. Начальная магнитная проницаемость сплавов Fe — Ni — Co после отжига при 1000° С с медленным охлаждением [16]

поле оказывает эффективное действие на перминвар только при охлаждении сплава от 800 до 400°С.

Термомагнитные сплавы. Основными критериями практической ценности термомагнитного сплава, считают: 1) магнитную индукцию; 2) обратимость и прямолинейность зависимости магнитных свойств от температуры в диапазоне от +50 до —70°С; 3) стабильность структуры сплава при воздействии отрицательных температур; 4) малую изменчивость магнитных свойств от колебаний химического состава.

К термомагнитным сплавам относятся, например, некоторые марки монель-металла. В табл. 28.37 приведен химический состав монель-металла, изготавливаемого в СССР согласно ГОСТ 492—73.

Химический состав монель-металла, % (ГОСТ 492—73*)

Марка сплава	Fe	Mn	Cu	Ni+Co	Si	Mg
НМЖМц 28-2,5-1,5	2—3	1,2—1,8	27—29	Остальное	Не более 0,05	Не более 0,1

Примечание. Общее содержание примесей (C, Sb, Pb, S, P, As, Bi...) должно быть не более 0,6%.

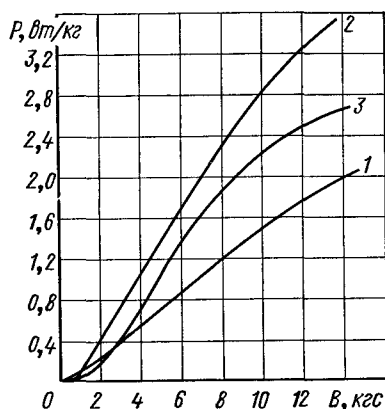


Рис. 28.92. Потери на гистерезис сплава 45-25 после термической обработки [16]:

1 — 1000°C , медленное охлаждение до 600°C ; 2 — 1000°C , быстрое с 600°C ; 3 — 1000°C , медленное охлаждение до 450°C ; 3 — 1000°C , медленное охлаждение до нормальной температуры

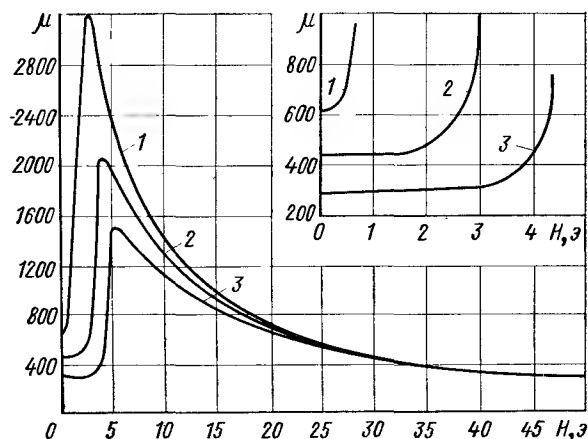


Рис. 28.93. Зависимость магнитной проницаемости перминвара 45-25 от термической обработки [16]: 1 — закалка на воздухе; 2 — отжиг; 3 — низкотемпературный (400—425°С) длительный отжиг

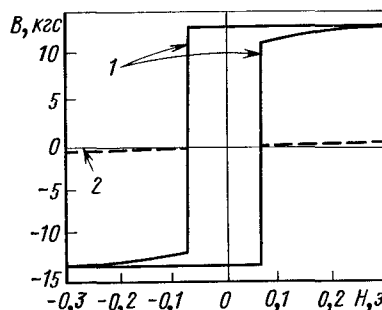


Рис. 28.94. Петли гистерезиса перминвара 45-25 после термической обработки в магнитном поле [16]:

1 — поле при измерении направлено параллельно магнитному полю при обработке; 2 — поле при измерении направлено перпендикулярно магнитному полю при обработке

Магнитотвердые материалы

Магнитотвердые сплавы мартенситного класса. Мартенсит представляет собой нестабильный твердый раствор углерода в α -железе с тетрагональной объемноцентрированной решеткой.

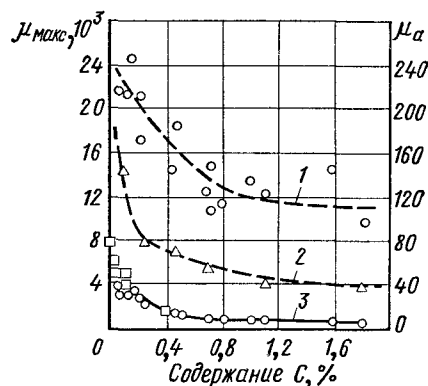


Рис. 28.95. Магнитная проницаемость углеродистой стали в зависимости от содержания углерода в зависимости от характера термической обработки [16]:

1 — μ_a после отжига; 2 — μ_a после закалки; 3 — $\mu_{\text{макс}}$ после закалки.

К магнитотвердым сплавам мартенситного класса относятся углеродистые стали, а также стали, легированные хромом, вольфрамом, кобальтом и молибденом, подвергающиеся ковке и прокатке при высоких температурах. Коэрцитивная сила этих сплавов составляет от 50 до 280 э; остаточная индукция — от 7 до 10 кгс и удельная энергия — от 10 000 до 40 000 эрг/см³ [16].

Углеродистые стали. В настоящее время углеродистая сталь в качестве магнитотвердого материала находит ограниченное применение в промышленности. Магнитные свойства углеродистой стали находятся в зависимости от содержания в ней углерода и структурной формы расположения его в твердой фазе (рис. 28.95 и 28.96).

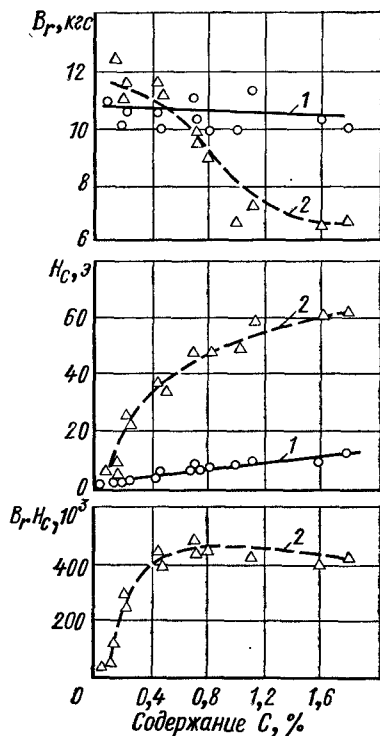


Рис. 28.96. Зависимость остаточной индукции (B_r), коэрцитивной силы (H_c) и $B_r \cdot H_c$ углеродистой стали от содержания углерода и термической обработки [16]:
1 — после отжига; 2 — после закалки.

Легированные стали. Марки легированной стали, применяемые для изготовления постоянных магнитов, определены в табл. 28.38 (см. также рис. 28.97, 28.98).

Вольфрамовая сталь имеет магнитные свойства, несколько лучшие, чем сталь, содержащая хром (рис. 28.99). Магнитные свойства вольфрамовой стали ухудшаются при нагревании в интервале температур 700—750° С и могут быть восстановлены нагреванием ее до 1200—1300° С с последующим ускоренным охлаждением на воздухе.

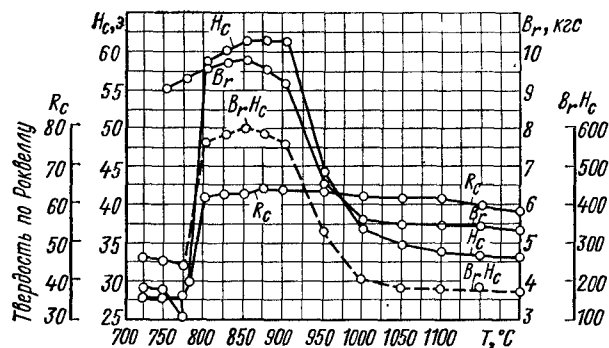


Рис. 28.97. Магнитные свойства и твердость по Роквеллу стали с 1,04% С и 1,58% Cr после прокатки (нагрев под чистую прокатку при 1100° С) и закалки при различных температурах в масле [16]

Таблица 28.38

Магнитные свойства легированной стали (ГОСТ 6862—71) [17]

Марка стали	Напряженность намагничивающего поля, 10 ³ э	B_r , 10 ³ гс (Не ниже)	H_c , э (Не ниже)
EX3	5	95	60
EB6	5	100	60
EX5K5	10	85	90
EX9K15M2	10	80	150

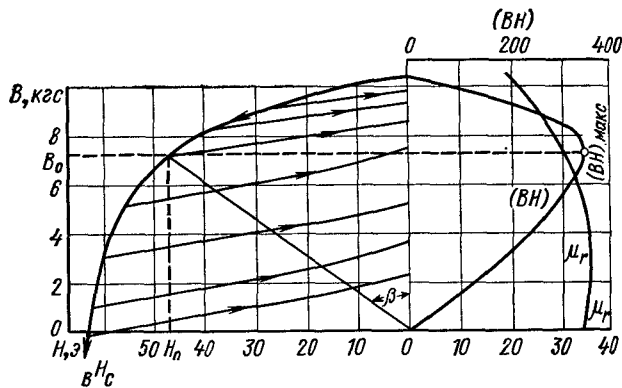


Рис. 28.98. Кривые размагничивания, магнитной энергии и обратной магнитной проницаемости хромистой стали (1,0% С и 3,0% Cr). Сечение 20 × 20 мм. Температурный коэффициент магнитной индукции равен — (2÷3) · 10⁻⁴ град⁻¹ [16]

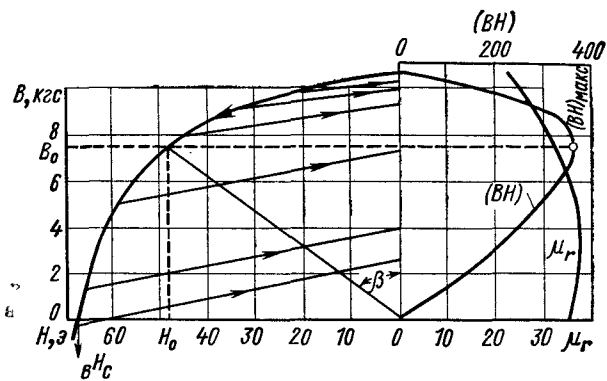


Рис. 28.99. Кривые размагничивания, магнитной энергии и обратимой магнитной проницаемости (возврата) вольфрамовой стали (0,55—0,8% С и 5,0—6,5% W). Сечение 10×10 мм. Значение температурного коэффициента индукции равно $-(2 \div 4) \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$ [16]

Магнитотвердые сплавы дисперсионного твердения. Магнитные свойства сплавов дисперсионного твердения зависят не только от химического состава, но в большей мере и от строения их в твердом состоянии. Важнейшим фактором, определяющим строение магнитного сплава дисперсионного твердения, являются процессы растворимости составляющих его элементов, которыми управляют посредством термической обработки.

В практике производства постоянных магнитов находят применение три основные группы сплавов дисперсионного твердения: а) сплавы, деформируемые (ковка и прокатка) в горячем состоянии; б) сплавы, применяемые в виде фасонных отливок; в) сплавы, деформируемые в холодном состоянии.

Сплавы, деформируемые в горячем состоянии. Распространены железокобальтмолибденовые сплавы. Наибольшую магнитную твердость эти сплавы приобретают после их быстрого охлаждения (закалки) при температуре 650—700°С (рис. 28.101, 28.102).

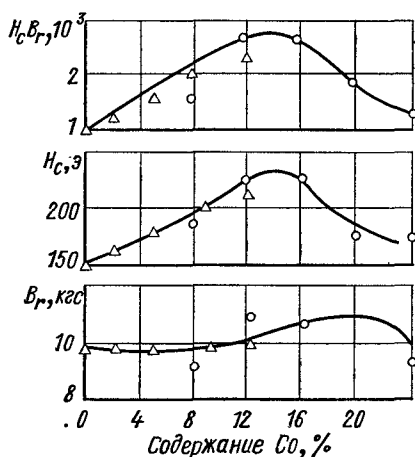


Рис. 28.100. Зависимость H_c , B_r и $H_c B_r$ в сплавах типа ремаллой от содержания Со (кривые относятся к сплавам, содержащим 16% молибдена) [16]

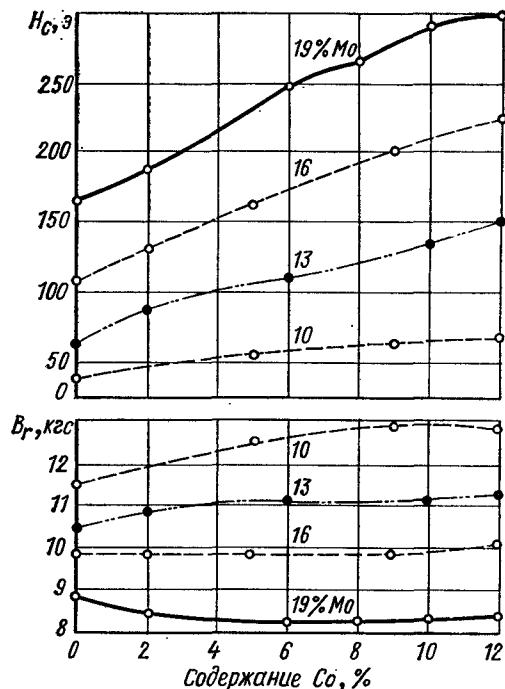


Рис. 28.101. Зависимость H_c и B_r Fe—Со—Мо-сплавов, термически обработанных на максимум этих свойств, от содержания Со (до 12%) и Мо (до 19%) [16]

Таблица 28.39

Зависимость магнитных свойств сплава типа ремаллой (72% Fe, 12% Со и 16% Мо) от температуры закали и отпуска в течение одного часа [16]

Температура закали, °С	Температура отпуска, °С	B_r , кГс	H_c , э	$B_r \cdot H_c$, $10^3 \text{ э} \cdot \text{Гс}$	B_{1700} , кГс
900	—	8,0	7	56	15,7
900	725	6,8	45	306	14,7
1100	—	3,0	7	21	18,5
1100	675	8,5	130	1105	—
1100	725	9,5	240	2280	15,3
1200	675	11,2	250	2800	—
1300	—	3,0	7	21	18,6
1300	610	11,0	40	440	17,3
1300	675	10,9	255	2789	—
1300	725	10,0	260	2600	14,8
1300	825	11,0	100	1100	15,3

Практическое применение получили также сплавы с содержанием 13—15% молибдена и 10—12% кобальта, известные под названием *ремаллой* или *комоль* (рис. 28.100).

Сплавы типа ремаллой подвергаются горячей механической обработке, закалке на воздухе или в масле от

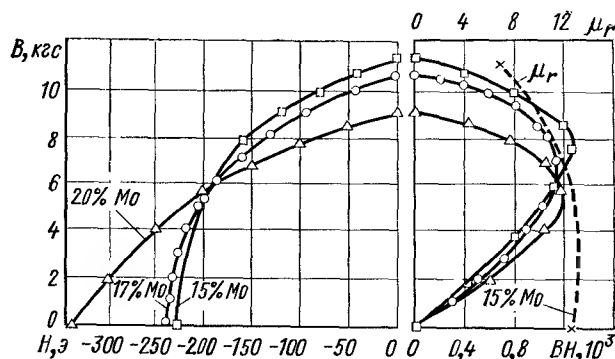


Рис. 28.102. Кривые намагничивания, магнитной энергии и обратной магнитной проницаемости сплавов Fe — Co — Mo при содержании 12% Co, 15,17 и 20% Mo [16]

1200—1300° С и последующему отпуску в течение одного часа от 650—700° С (табл. 28.39).

Сплав типа ремаллой мало чувствителен к нарушениям режима термической обработки и содержания основных элементов.

Сплавы, применяемые в литом состоянии. К этой группе магнитотвердых материалов относятся *α-сплавы системы железо — никель — алюминий*, а также их модификации, получаемые за счет введения в них кремния, меди, кобальта и других элементов.

Таблица 28.40

Химический состав и магнитные свойства некоторых сплавов на основе Fe, Ni, Al (ГОСТ 17809—72)^{4*}

Марка*	Состав, % ^{2*}	B_r , эс	H_c , э	$\frac{(BH)_{\text{макс}}}{8\pi}$, $\frac{\text{эрг}}{\text{см}^3}$	B/H ^{3*}
		не менее			
ЮНД4	13,5Al; 24,5Ni; 3,5 Cu; 0,25 Ti	5 000	500	36 000	9,6—12,7
ЮНД8	11Al; 28Ni; 8Cu	6 000	550	51 000	10,3—12,7
ЮНДК15	9Al; 19,5Ni; 3,5Cu; 14,5Co; 0,25 Ti	7 500	600	60 000	12,3—14,3
ЮНДК18	9,5Al; 18,5Ni; 3,5Cu; 18,5Co	9 000	700	97 000	12—16
ЮН14ДК24Т2	8,5Al; 14,5Ni; 3,5Cu; 24Co; 2,0Ti	11 000	750	150 000	12,7—15,1
ЮН13ДК25А	8Al; 13Ni; 3,5Cu; 25Co	14 000	550	280 000	22—24

* Ю — алюминий; Н — никель; Д — медь; К — кобальт; Т — титан; А — кристаллическая текстура.

^{2*} Данные по составу усреднены.

^{3*} В точке $(BH)_{\max}$.

^{4*} ГОСТ 17809—72 содержит данные еще девятнадцати марок литых сплавов, предназначенных для постоянных магнитов.

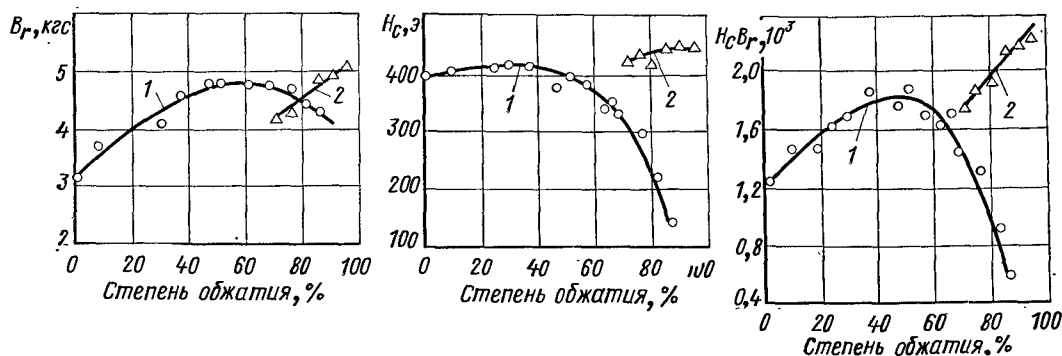


Рис. 28.103. Влияние степени обжатия при прокатке на магнитные свойства сплава, содержащего 60% Cu, 20% Ni, 20% Fe [16]:

1 — после одночасового отпуска при 650° С и прокатки; 2 — после отпуска, прокатки и повторного отпуска (старения)

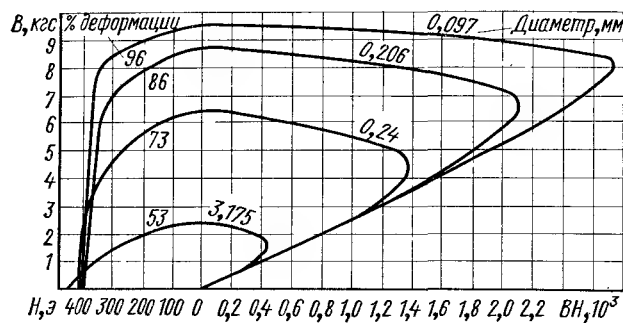


Рис. 28.104. Влияние деформации проволоки из сплава викаллой на размагничивание и магнитную энергию [16]

Все литые магнитотвердые сплавы имеют крупнозернистое строение, высокую твердость и большую хрупкость.

Литые магнитотвердые сплавы обладают высокой устойчивостью на старение. Уменьшение твердости и хрупкости сплавов достигается при помощи отжига их по следующему режиму:

а) медленный нагрев до 950–1050° С в печи с нейтральной или слабоокислительной атмосферой;

б) выдержка в печи после прогрева не менее 5–7 ч;

в) охлаждение вместе с печью до 500° С со скоростью не более 50–70° в 1ч, дальнейшее охлаждение на воздухе.

Таблица 28.41

Влияние обработки на магнитные свойства сплава
60% Cu, 20% Ni, 20% Fe [16]

Режим обработки	B_r , кэс	H_c , э	$B_r H_c$, 10^3 эс·э	$(BH)_{\max}$, 10^3 эс·э/см ³
Литье, гомогенизация, закалка от 1000°С	2,0	200	400	—
Старение при 650°С	2,2	400	880	—
Последующая холодная прокатка до 95% обжатия и старение при 650°С	5,0	440	2200	—
Литье, гомогенизация, ковка (обжатие на 95%), закалка от 1070°С, холодная вытяжка до окончательного размера, старение при 600°С (кунифе)	5,8	600	3500	2,0
Промышленный материал (кунифе)	5,4	550	3000	1,7

Магнитные свойства викаллой

Марка сплава*	ТУ 14-1-803-73 Проволока			ТУ 14-1-826-74 Лист		
	H_c , э	B_r , кэс	$B_r H_c$, кэс·э	H_c , э	B_r , кэс	$B_r H_c$, кэс·э
52К13Ф(52КФА)	—	—	—	350	6,0	$2,3 \cdot 10^3$
52К12Ф(52КФБ)	350	8,5	$3 \cdot 10^3$	300	7,5	$2,4 \cdot 10^3$
52К11Ф(52КФВ)	300	10,0	$3 \cdot 10^3$	220	10,0	$2,4 \cdot 10^3$

* Содержание основных компонентов см. в табл. 28.43.

** Допускается снижение H_c на 10% или B_r на 5% при условии сохранения постоянным произведения $B_r H_c$.

Сплавы, деформируемые в холодном состоянии. К этой группе магнитотвердых материалов относятся сплавы следующих систем: медь — никель — железо, медь — никель — кобальт, железо — марганец, легированные алюминием или титаном, а также сплавы железо — кобальт — ванадий — викалой (рис. 28.104, табл. 28.42, 28.43).

В системе медь — никель — железо имеется ряд сплавов, которые после термической обработки и холодной деформации могут приобрести высокие магнитные свойства ($B_r = 6$ кэс при $H_c 500$ э).

Среди сплавов этой системы лучшими свойствами обладает сплав, содержащий 60% меди, 20% никеля и 20% железа, называемый *кунифе* (рис. 28.103, табл. 28.41).

Таблица 28.43

Содержание основных компонентов (массовое содержание, %) в сплавах 52 КФ (ГОСТ 10994-74)

Марка сплава	V	Co
52К13Ф	12,6—13,5	52—54
52К12Ф	11,6—12,5	52—54
52К11Ф	10,0—11,5	52—54

Химический состав, основные технические характеристики и примерное назначение прецизионных сплавов различных марок (включая марки сплавов табл. 28.42, 28.43) содержатся в ГОСТ 10994-74.

Таблица 28.44

Свойства металлокерамических постоянных магнитов
(ГОСТ 13596—68)*

Марка	B_r^{**} , эс (не менее)	H_c^{**} , э (не менее)	$(BH)_{\text{макс}}$, $\frac{2}{\text{дж/м}^3}$ (не менее)	B_d^{**} , эс	H_d^{**} , э
ММК1	6000	300	3 000	3500	200
ММК2	4800	500	3 500	3000	300
ММК3	5200	550	4 000	3000	350
ММК4	5500	500	4 500	3000	350
ММК5	6000	550	4 700	3500	350
ММК6	6500	550	5 000	4000	300
ММК7	9500	550	10 500	6000	450
ММК8	11000	500	14 000	8000	450
ММК9	7500	1000	12 000	4500	650
ММК10	8000	1200	15 000	5300	700
ММК11	7000	1600	16 000	4000	1000

*. Изготавливаются методом порошковой металлургии.

** В точке $(BH)_{\text{макс}}$ значения в таблице факультативны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вонсовский С. В., Шур Я. С. Ферромагнетизм. М. — Л., Гостехтеориздат, 1948.

- American Institute of Physics Handbook. New York—Toronto—London, McGrawHill Book Co., Inc., 1963.
- Danan H., Herr A., Meyer A. J. P. "J. Appl. Phys.", 1968, v. 39, N 2, pt 1, p. 669.
- Вонсовский С. В. Магнетизм. М., «Наука», 1971.
- Tatsumoto E. e. a. International Conference on Magnetism. Grenoble, France, September 14—19, 1970. Program and Abstracts, 1970.
- Бозорт Р. Ферромагнетизм. Пер. с англ. Под ред. Е. И. Кондорского и Б. Г. Лившица. М., Изд-во иностр. лит., 1956.
- Lin S. T., Ogilvie R. E. "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1372.
- Landolt-Börnstein. Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Geophysik, Technik. II Bd, 9 Teil. Springer-Verlag, Berlin-Göttingen—Heidelberg, 1962.
- Weiss P., Forrer R. "Ann. Phys.", 1929, v. 12, p. 279.
- Potter H. H. "Proc. Roy. Soc.", 1934, v. 146A, p. 362.
- Magnetismus, Struktur und Eigenschaften magnetischer Festkörper, Leipzig, 1967.
- Техническая энциклопедия. Справочник физических, химических и технологических величин. Т. 4. М., «Советская энциклопедия», 1930.
- Белов К. П. и др. Редкоземельные ферромагнетики и антиферромагнетики. М., «Наука», 1965.
- Guilland Ch. "Compt. rend. Acad. sci.", 1946, v. 222, p. 1224.
- Белов К. П. Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнетиках. Изд. 2-е, доп. М., Гостехтеориздат, 1957.
- Справочник по электротехническим материалам. Под ред. К. А. Андрианова, Н. П. Богородицкого, Ю. В. Корицкого, В. В. Пасыкова, Б. М. Тареева. Т. II. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
- Готман П. Е., Березин В. Б., Хайкин А. М. Электротехнические материалы. Справочник, изд. 2-е, доп. и перераб. М., «Энергия», 1969.

ГЛАВА 29

ФЕРРИТЫ

29.1. ФЕРРИТЫ-ШПИНЕЛИ

Ферриты-шпинели имеют кристаллическую структуру типа минерала шпинели $MgAl_2O_4$ и химическую формулу $Me^{2+}Fe^{3+}_2O_4$, где Me^{2+} — ион двухвалентного металла, а ионы железа Fe^{3+} трехвалентны. В случае простых ферритов Me представляет собой один из двухвалентных ионов переходных элементов, например Mn , Ni , Co или Mg ; возможна также комбинация этих ионов (твердые растворы ферритов, или смешанные ферриты). Трехвалентные ионы железа в $MeFe_2O_4$ могут быть полностью или частично замещены другими трехвалентными ионами, например Al^{3+} или Cr^{3+} (смешанные ферриты-алюминаты или ферриты-хромиты).

В структуре типа шпинели ионы кислорода образуют гранцецентрированную кубическую решетку с ребром a . В промежутках между ионами кислорода находятся ионы металлов, причем эти ионы окружены четырьмя или шестью ионами кислорода. Такие окружения называются соответственно тетраэдрическими (или A) и октаэдрическими (или B) узлами. Шпинели, в которых Me^{2+} находится в тетраэдрических узлах, а ионы Fe^{3+} — в октаэдрических, называются нормальными. Если ионы Me^{2+} и половина ионов Fe^{3+} находятся в октаэдрических узлах, то шпинель называют обращенной.

Принято ионы, занимающие тетраэдрические узлы, записывать в формуле феррита перед квадратными скобками, а ионы, занимающие октаэдрические узлы — в скобках. Тогда, например, формула феррита цинка, имеющего структуру нормальной шпинели, запишется $Zn^{2+}[Fe^{3+}]_2O_4$, а никелевого феррита со структурой обращенной шпинели — формулой $Fe^{3+}[Ni^{2+}Fe^{3+}]_2O_4$. Структура шпинели изображена схематически на рис. 29.1.

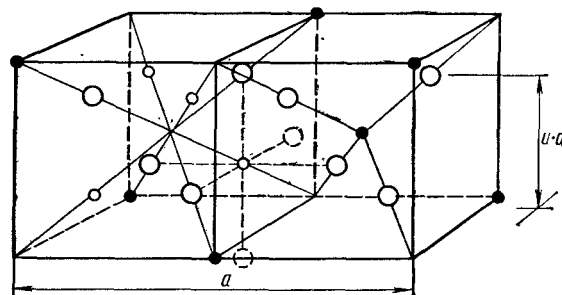


Рис. 29.1. Два октанта шпинельной структуры. Большими светлыми кружками обозначены ионы кислорода, малыми светлыми и черными кружками — ионы металла в октаэдрических и тетраэдрических узлах соответственно [5]

Простые ферриты

Основные параметры простых ферритов

Параметр*	Fe_3O_4	Литера- тура	MgFe_2O_4	Литера- тура	MnFe_2O_4	Литера- тура
Постоянная решетки a , Å	8,39	[5]	8,36	[50]	8,517	[23]
Распределение ионов металлов	$\text{Fe}[\text{Fe}^{2+}\text{Fe}]$	[6]	$\text{Mg}_{0,1}\text{Fe}_{0,9}$ [$\text{Mg}_{0,9}\text{Fe}_{1,1}$]	[50, 51]	$\text{Mn}_{0,8}\text{Fe}_{0,2}$ [$\text{Mn}_{0,2}\text{Fe}_{1,8}$]	[23]
Кислородный параметр u	0,379	[6]	0,381	[50]	0,385	[23]
Рентгеновская плотность ρ_X , г/см ³	5,24	[6]	4,52	[50]	5,0	[23]
Точка Кюри T_C , °C	585	[5]	440	[5]	300	[5]
Магнитный момент на молекулу μ_m^0 , ВБ	4,1(0°K)	[6]	1,1(25°K)	[52]	4,6(0°K)	[23]
Удельная намагниченность насыщения σ_s , эс·см ³ /г	98(0°K) 92(300°K)	[5] [5]	31(0°K) 27(300°K)	[5] [5]	112(0°K) 80(300°K)	[5] [5]
Индукция насыщения $4\pi M_s$, эс	6400(0°K) 6000(300°K)	[5] [5]	1800(0°K) 1500(300°K)	[5] [5]	7000(0°K) 5000(300°K)	[5] [5]
Первая константа анизотропии K_1 , 10 ⁴ эрг/см ³	-10,7	[7]	-3,5 -2,5	[53] [54]	-18,7(77°K) -2,8(300°K)	[24] [24]
Вторая константа анизотропии K_2 , 10 ⁴ эрг/см ³	-2,8	[7]	—	—	-0,3(77°K) -0,2(300°K)	[24] [24]
Константа магнитострикции λ , 10 ⁻⁶	77,6[111] 57,1[110] -19,5[100]	[8] [8] [8]	-6(λ_s)	[17]	1[111] -35[100] -5(λ_s)	[14] [14] [15]
Фактор спектроскопического расщеп- ления g	2,03(123°K) 2,12(294°K)	[9] [9]	2,03 2,06 (поликр.)	[55]	2,019(77°K) 2,004(300°K)	[24] [24]
Ширина линии ферромагнитного ре- зонанса ΔH , э	—	—	20	[53]	12(423°K) 13(294°K)	[25] [26]
Начальная магнитная проницаемость μ_0	70 (поликр.)	[8]	36 (поликр.)	[54]	250	[5]
Диэлектрическая проницаемость $\epsilon - \epsilon' - i\epsilon''$	—	—	$\epsilon' = 9,661^*$ $\epsilon'' = 0,17$	[42] [42]	—	—
Удельное сопротивление ρ_0 , 10 ⁸ ом·см	5·10 ⁻⁹	[10, 43]	~12*	[44]	2·10 ⁻³ 3*	[27]

* Значения физических величин приведены, если не оговорено специально, для монокристаллов при температуре 20°С.

1* Измерено на частоте 4,55 Гц в поликристаллических образцах.

2* При температуре $T = 100^\circ\text{C}$.

3* Для состава $\text{Mn}_{1,16}\text{Fe}_{1,84}\text{O}_4$.

4* Структура медного феррита CuFe_2O_4 зависит от термообработки. При медленном охлаждении ниже определенной температуры трансформации $T_{\text{тр}}$ происходит переход кубической структуры в тетрагональную. Температура $T_{\text{тр}} = 760^\circ\text{C}$, согласно [36], 415°C [56] и 390°C [57]. Однако в результате закалывания $T > T_{\text{тр}}$ кубическая структура сохраняется и при комнатной температуре.

CuFe_2O_4	Литре- патра	[34]	8,38	[17]	8,337	[11, 13]	8,33	[28]
$\text{Fe}[\text{CuFe}]$	[36]	$\text{Fe}[\text{CoFe}]$	[45]	$\text{Fe}[\text{NiFe}]$	[12]	$\text{Fe}[\text{Li}_{0,5}\text{Fe}_{1,5}]$	[28]	
0,380	[12]	0,381	[45]	—	—	0,382	[28]	
5,35	[12]	5,29	[45]	5,37	[13]	4,75	[28]	
455	[5]	520	[5]	585	[13]	670	[5]	
$2,34^*$ (квб.) (°K) $1,3$ (терп.) (°K)	[37] [37]	$3,94(0^\circ\text{K})$	[46]	$2,3(0^\circ\text{K})$	[5]	$2,6(0^\circ\text{K})$	[5]	
$30(0^\circ\text{K})$	[5]	$90(0^\circ\text{K})$	[5]	$56(0^\circ\text{K})$	[5]	$69(0^\circ\text{K})$	[5]	
$25(300^\circ\text{K})$	[5]	$80(300^\circ\text{K})$	[5]	$50(300^\circ\text{K})$	[5]	$65(300^\circ\text{K})$	[5]	
$2000(0^\circ\text{K})$	[5]	$6000(0^\circ\text{K})$	[5]	$3800(0^\circ\text{K})$	[5]	$4200(0^\circ\text{K})$	[5]	
$1700(300^\circ\text{K})$	[5]	$5300(300^\circ\text{K})$	[5]	$3400(300^\circ\text{K})$	[5]	$3900(300^\circ\text{K})$	[5]	
$-20,6(77^\circ\text{K})$	[38]	$4,4 \cdot 10^{-7}(77^\circ\text{K})$	[15]	$-8,7(77^\circ\text{K})$	[14]	$-12,7(77^\circ\text{K})$	[29]	
$-6,3(300^\circ\text{K})$	[38]	$2,9 \cdot 10^{-7}(300^\circ\text{K})$	[15]	$-6,2(300^\circ\text{K})$	[14]	$-8,4(300^\circ\text{K})$	[29]	
—	—	—	—	—3	[16]	$-9,7(77^\circ\text{K})$	[30]	
$-15(\lambda_s)$	[39]	$120 [111]^*$ $-590 [100]$ $-110 (\lambda_s)$	[15] [47] [15]	$-4 [111]$ $-36 [100]$ $-26(\lambda_s)$	[14] [14] [17]	$-8(\lambda_s)$	[31]	
$2,20(77^\circ\text{K})$	[39]	$2,7(363^\circ\text{K})$ (монокр.) $2,22(373^\circ\text{K})$ (поликр.)	[48] [49]	$2,198(85^\circ\text{K})$ $2,196(298^\circ\text{K})$	[18] [18]	$2,012(77^\circ\text{K})$ $2,003(300^\circ\text{K})$	[30] [30]	
350 (поликр.)	[41]	—	—	$9,5$ 15	[19] [20]	$0,8(134^\circ\text{K})$ $1,7(300^\circ\text{K})$	[32] [32]	
70	[40]	25 (поликр.)	[5]	80 (монокр.) 39 (поликр.)	[14] [21]	33 (поликр.)	[5]	
$\epsilon' = 9,24^*$ $\epsilon'' = 0,52$	[42]	$\epsilon' = 10^*$	[42]	19 (монокр.) 21 (поликр.)	[14] [14]	—	—	
$\sim 10^*$	[44]	0,59*	[44]	2	[22]	$\sim 1 \cdot 10^{-4}$	[33]	

Измерено на частоте $4,55 \text{ ТГц}$ в полупроводниковых образцах.
При температуре $T = 100^\circ\text{C}$.
Состав образца $\text{Co}_0,8\text{Fe}_{1,2}\text{O}_4$.
Измерено на частоте $4,55 \text{ ТГц}$ в полупроводниковых образцах.
При температуре $T = 100^\circ\text{C}$.

Таблица 29.2

Результаты экспериментов по дифракции нейтронов в ряде образцов феррита $Mg_xMn_{1-x}Fe_2O_4$ [11]

Обозначения: $T_{зак}$ — температура закалывания; a — постоянная решетки; u — кислородный параметр.

x	$T_{зак}, ^\circ C$	$a, \text{\AA}$	u	Доля ионов в тетраэдрических узлах	
				Mg^{2+}	Mn^{2+}
0,25	1400	8,485	0,3850	0,12	0,89
0,25	1000	8,479	0,3848	0,09	0,78
0,5	1400	8,455	0,3839	0,18	0,92
0,5	1000	8,450	0,3836	0,14	0,82
0,75	1400	8,424	0,3834	0,24	0,90
0,75	1000	8,421	0,3831	0,21	0,98
0,9	1400	8,406	0,3831	0,25	1,00
0,9	1000	8,403	0,3821	0,21	0,90

Зависимость намагниченности насыщения M_s и фактора спектроскопического расщепления g для поликристаллического феррита $Co_{0,7}Zn_{0,3}Fe_2O_4$ от температуры. Приведены также значения g -фактора и первой константы анизотропии K_1 для монокристалла того же состава. Точка Кюри $T_C = 340^\circ C$. Измерения в интервале температур от $-50^\circ C$ до $+10^\circ C$ проводились на частоте 23,6 Гц, а в интервале от 20 до $280^\circ C$ — на частоте 9,25 Гц [60, 61]

$T, ^\circ C$	Поликристалл		Монокристалл	
	$M_s, эс$	g	g	$K_1, 10^6 эрг/см^3$
-50	560	—	1,90	12,03
-25	545	—	1,90	8,41
10	500	—	1,91	4,51
20	506	2,07	1,91	2,36
40	450	2,10	1,92	1,34
60	381	2,11	1,96	0,16
80	338	2,12	2,06	-0,21
120	269	2,15	2,12	-0,41
160	203	2,16	2,12	-0,34
200	134	2,17	2,17	-0,21
240	61	2,18	2,16	-0,07
280	8	2,19	2,15	-0,01

Таблица 29.5

Зависимость некоторых параметров кобальт-цинкового феррита $Co_xZn_{1-x}Fe_2O_4$ от содержания кобальта x [58, 59]

Обозначения: T_C — точка Кюри; p_m^0 — магнитный момент на молекулу; σ_s — удельная намагниченность насыщения

x	$T_C, ^\circ C$	p_m^0, μ_B	$\sigma_s, эс \cdot см^3/г$			
			$T = -285^\circ K$	$T = -77^\circ K$	$T = -20^\circ K$	$T = 0^\circ K$
0,2	25	4,06	18,5	62,0	72,6	95,0
0,3	82	4,90	39,3	91,0	95,5	114,0
0,4	137	5,78	61,0	119,2	126,0	132,0
0,6	275	6,03	87,5	128,5	133,2	143,0
0,8	389	4,87	93,7	110,0	110,0	115,5
0,9	460	4,29	90,0	93,9	94,1	102,0
1,0	515	3,67	83,6	83,0	82,6	87,5

Зависимость некоторых параметров никелевого феррита — алюмината $NiFe_{2-x}Al_xO_4$ от содержания алюминия x [62, 63]

Обозначения: a — постоянная решетки; T_C — точка Кюри; p_m^0 — магнитный момент на молекулу, g — фактор спектроскопического расщепления

x	$a, \text{\AA}$	$T_C, ^\circ C$	p_m^0, μ_B		g
			медленное охлаждение	закалка при $1350^\circ C$	
0,00	8,3370	580	2,29	2,29	2,3
0,25	8,3062	506	1,30	1,59	2,7
0,45	8,2769	465	0,61	1,19	—
0,50	8,2705	430	0,44	0,99	6,9
0,625	8,2521	360	0—0,045	—	3,8
0,75	8,2329	294	0,38	0,58	1,5
1,00	8,1951	198	0,64	0,42	—

Таблица 29.6

Свойство*		Соержание алюминия x в $\text{NiMn}_{0,02}\text{Fe}_{2-x}\text{Al}_x\text{O}_4$									
		$\text{Ni}_{0,975}\text{Co}_{0,025}\text{Mn}_{0,02}\text{Fe}_{1,7}\text{Al}_{0,3}\text{O}_4$	0	0,2	0,4	0,5	0,65	0,75	1,20	1,30	
Фактор спектроскопического расщепления g	2,34	2,38	2,65	2,97	4,40	—	1,38	2,47	2,35		
Ширина линии ферромагнитного ΔH , э	460	480	550	660	1180	—	150	530	200		
Точка Кюри T_C , °C	585	500	420	375	310	275	80	460	460		
Намагниченность насыщения M_s , эс	257	174	119	83	37	20	27	157	158		
Поле анизотропии H_a^* , э	260	450	590	800	1500	—	125	480	<170		
Резонансная частота для сферического образца $f_{\text{рез}} = 1,4 g H_a$, МГц	850	1500	2190	3320	9200	—	240	1660	<560		
Максимальная резонансная частота для сферического образца $f_{\text{макс}} = 1,4g (H_a + 4\pi M_s)$, МГц	12000	9000	7000	6500	10000	>10000	1200	7000	7000		
Начальная проницаемость μ_0	28	20	10	6	2	—	3	—	—		
Положение 1-го пика в спектре μ''/f_1 , МГц	100	100	230	350	800	—	250	—	—		
Положение 2-го пика в спектре μ''/f_2 , МГц	1700	1800	2300	3000	8000	—	—	2100	—		
Плотность ρ , г/см ³	5,13	5,08	5,02	4,98	4,90	4,74	4,27	4,98	5,15		

Таблица 29.7

Связь между плотностью и некоторыми СВЧ-параметрами феррита $\text{NiMn}_{0,02}\text{Fe}_{1,9}\text{O}_4$ [64]

Рентгеновская плотность $\rho_X = 5,38 \text{ г/см}^3$, $K_1 = -5 \cdot 10^4 \text{ эрг/см}^3$, $T_C = 585^\circ\text{C}$, $4\pi M_S = 3230 \text{ гс}$ (обозначения см. в табл. 29.6)

Плотность		ρ	ΔH , э	H_a , э	μ_0	$f_{\text{рез}}^*$, МГц	$f_{\text{макс}}^{**}$, МГц	f_1 , МГц	f_2 , МГц
ρ , г/см ³	ρ , % ρ_X								
5,13	95,4	2,34	460	260	28	850	12000	100	1700
4,96	92,3	2,36	515	260	20,5	850	12000	170	1600
4,85	90,2	2,35	550	260	17	850	—	330	—
4,59	85,3	2,39	770	260	13	850	12000	350	—
3,81	70,8	2,43	1320	260	6,5	850	12000	650	—

$$* H_a = \frac{4}{3} \frac{|K_1|}{M_S}$$

$$** f_{\text{рез}} = 1,4 H_a \text{ при внешнем поле } H = 0.$$

$$*** f_{\text{макс}} = 1,4 g(H_a + 4\pi M_S) \text{ при внешнем поле } H = 0.$$

Таблица 29.8

Значения фактора спектроскопического расщепления g и магнитного момента на молекулу p_m^0 для феррита LiFe_5O_8 и его твердых растворов с CdFe_2O_4 и LiAl_5O_8 [65]

Состав	$g(T = -300^\circ\text{K})$	p_m^0 , μ_B
LiFe_5O_8	1,96	2,38
$(\text{LiFe}_5\text{O}_8)_{0,75}(\text{CdFe}_2\text{O}_4)_{0,25}$	1,97	3,44
$(\text{LiFe}_5\text{O}_8)_{0,65}(\text{CdFe}_2\text{O}_4)_{0,35}$	1,96	4,10
$(\text{LiFe}_5\text{O}_8)_{0,50}(\text{CdFe}_2\text{O}_4)_{0,50}$	1,97	4,70
$(\text{LiFe}_5\text{O}_8)_{0,25}(\text{CdFe}_2\text{O}_4)_{0,75}$	1,99	4,53
$\text{Li}(\text{Fe}_{0,9}\text{Al}_{0,1})_5\text{O}_8$	1,97	1,99
$\text{Li}(\text{Fe}_{0,8}\text{Al}_{0,2})_5\text{O}_8$	1,99	0,62
$\text{Li}(\text{Fe}_{0,7}\text{Al}_{0,3})_5\text{O}_8$	2,01	0,10
$\text{Li}(\text{Fe}_{0,6}\text{Al}_{0,4})_5\text{O}_8$	—	0,13

Таблица 29.9

Зависимость параметров литий-хромовых ферритов от содержания хрома [66]

Содержание хрома x	Распределение ионов металлов	a , Å	T_C , °C	$T_{\text{компл}}$, °C	p_m^0 , μ_B
0	$\text{Fe}_{1,00}[\text{Li}_{0,50}\text{Fe}_{1,50}]\text{O}_4$	8,331	680	—	$2,47 \div 2,60$
0,50	$\text{Fe}_{1,00}[\text{Li}_{0,50}\text{Fe}_{1,0}\text{Cr}_{0,50}]\text{O}_4$	8,306	500	—	$1,50 \div 1,62$
0,75	$\text{Fe}_{0,98}\text{Li}_{0,02}[\text{Li}_{0,48}\text{Fe}_{0,77}\text{Cr}_{0,75}]\text{O}_4$	8,296	410	—	1,35
1,00	$\text{Fe}_{0,94}\text{Li}_{0,04}[\text{Li}_{0,44}\text{Fe}_{0,56}\text{Cr}_{1,00}]\text{O}_4$	8,292	315	205	0,84
1,25	$\text{Fe}_{0,91}\text{Li}_{0,09}[\text{Li}_{0,41}\text{Fe}_{0,34}\text{Cr}_{1,25}]\text{O}_4$	8,290	214	38	0,61
1,50	$\text{Fe}_{0,80}\text{Li}_{0,20}[\text{Li}_{0,30}\text{Fe}_{0,20}\text{Cr}_{1,50}]\text{O}_4$	8,287	119	—16	0,55
1,60	$\text{Fe}_{0,64}\text{Li}_{0,36}[\text{Li}_{0,14}\text{Fe}_{0,26}\text{Cr}_{1,60}]\text{O}_4$	8,288	167	11	0,42
1,70	$\text{Fe}_{0,54}\text{Li}_{0,46}[\text{Li}_{0,04}\text{Fe}_{0,26}\text{Cr}_{1,70}]\text{O}_4$	8,290	155	20	0,22
2,00	$\text{Fe}_{0,50}\text{Li}_{0,50}[\text{Cr}_{2,00}]\text{O}_4$	8,288	80 ± 16	37 ± 15	0,10

Таблица 29.10

Напряженность порогового поля H_0 и константа переключения S_W некоторых ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса [67]

Обозначение: H_0 — минимальная напряженность магнитного поля, необходимая для переключения; время переключения $\tau = S_W / (H_m - H_0)$, где S_W — константа переключения; H_m — амплитуда переключающего импульса магнитного поля

Ферриты	H_0 , э	S_W , э·мксек
$\text{Mg}_{0,45}\text{Mn}_{0,55}^{2+}\text{Mn}_{0,23}\text{Fe}_{1,77}\text{O}_4$	0,9	0,9
$\text{Cu}_{0,25}\text{Mn}_{0,75}\text{Fe}_2\text{O}_4$	0,85	0,8
$\text{Mg}_{0,6}\text{Ni}_{0,4}\text{Fe}_2\text{O}_4$	3,6	2,2
$\text{Li}_{0,47}\text{Ni}_{0,06}\text{Fe}_{2,47}\text{O}_4$	2,2	1,0
$\text{Co}_{0,1}\text{Fe}_{0,9}^{2+}\text{Fe}_2\text{O}_4$	8,0	105,0
MnFe_2O_4	0,5	3,2

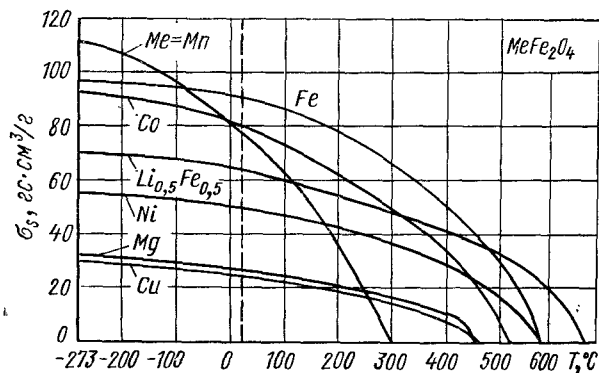
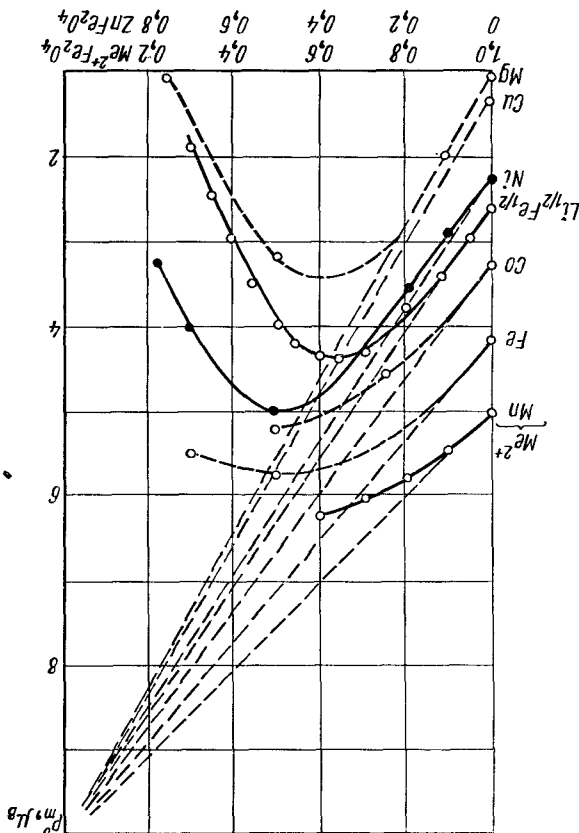


Рис. 29.2. Зависимость удельной намагниченности насыщения σ_s для некоторых простых ферритов-шпинелей от температуры [5]



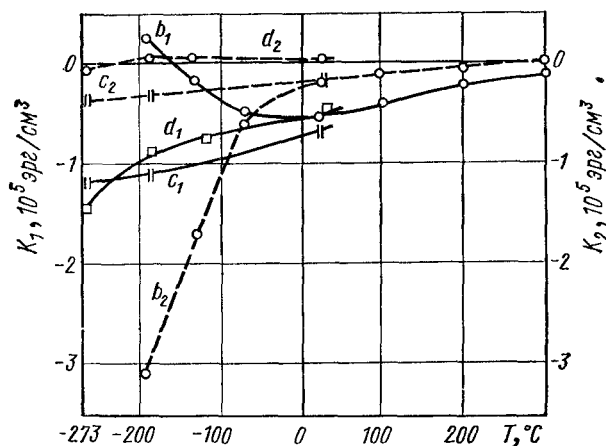


Рис. 29.6. Зависимости первой K_1 (сплошная линия) и второй K_2 (пунктир) констант анизотропии от температуры для следующих ферритов [16]:

NiFe_2O_4 — кривые b_1 и b_2 ; $\text{Ni}_{0,95}\text{Fe}_{0,05}^{2+}\text{Fe}_2\text{O}_4$ — кривые c_1 и c_2 ; $\text{Ni}_{0,75}\text{Fe}_{0,25}^{2+}\text{Fe}_2\text{O}_4$ — кривые d_1 и d_2

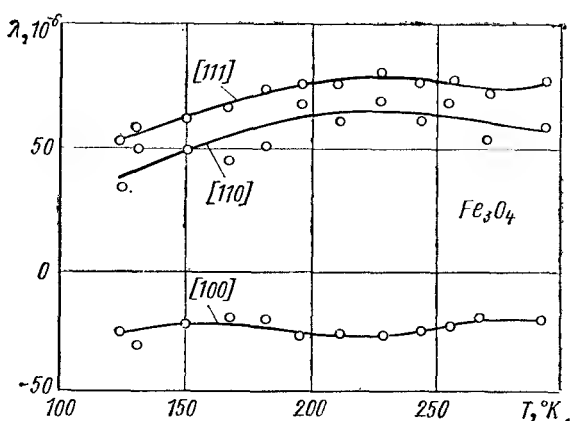


Рис. 29.7. Зависимость констант магнитострикции λ_{100} , λ_{111} и λ_{110} искусственного монокристалла магнетита от температуры [8]

были поняты на основе коллинеарной модели Нееля о подрешеточном строении ферромагнитных соединений [85]. В гранатах, в отличие от ферритов со структурой шпиннели, были введены в рассмотрение три магнитные подрешетки. Наиболее сильное антиферромагнитное взаимодействие, определяющее точку Кюри T_C , осуществляется между ионами трехвалентного железа в октаэдрической $16a$ - и тетраэдрической $24d$ -подрешетках. Подрешетка редкоземельных ионов $24c$ -наиболее сильно связана отрицательным обменным взаимодействием с тетраэдрической подрешеткой (в гранатах с легкими редкоземельными ионами от Pr до Sm с октаэдрической подрешеткой), причем эта связь примерно в 10 раз слабее, чем $(a-d)$ -взаимодействие. Намагниченность насыщения M_s в случае тяжелых редкоземельных гра-

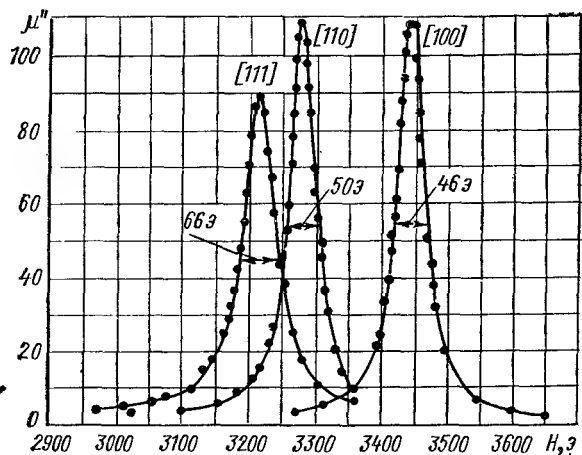


Рис. 29.8. Кривые ферромагнитного резонанса для монокристалла $\text{Mn}_{0,89}\text{Fe}_{1,86}\text{O}_4$ [24]. Образец имел форму сферы диаметром $\sim 0,25$ мм. Кривые сняты при комнатной температуре на частоте 9300 МГц и соответствуют трем главным кристаллографическим направлениям, по которым направлено постоянное магнитное поле

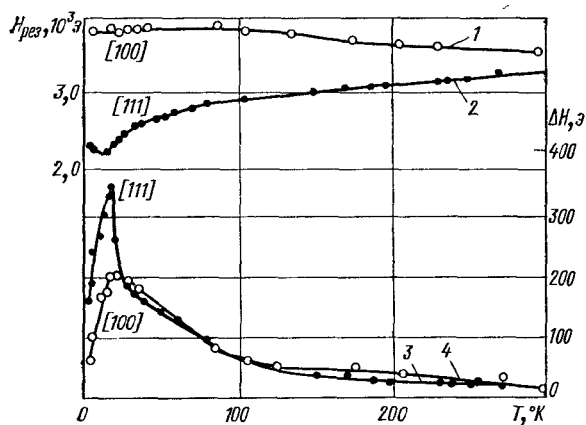


Рис. 29.9. Зависимости резонансного поля $H_{\text{рез}}$ (кривые 1, 2) и ширины кривой ферромагнитного резонанса ΔH (3, 4) для сферы из монокристалла феррита $\text{Mn}_{1,03}\text{Fe}_{1,95}\text{O}_4$ ($\lambda = 3,2$ см) от температуры [69]. Наличие максимумов при $T = 20^\circ \text{K}$ на кривых $\Delta H(T)$, по-видимому, обусловлено ионами Mn^{3+} или ионами Mn еще более высокой валентности

нтов может быть записана следующим образом через намагниченности отдельных подрешеток:

$$M_s = M_{24d} - M_{16a} - M_{24c}.$$

Ферромагнитный резонанс и анизотропия. Ферриты-гранаты имеют меньшую удельную намагниченность, чем ферриты-шпиннели и большой интерес к ним был вызван в основном их уникальными свойствами в СВЧ-диапазоне. Минимальные значения ширины линий ферромагнитного резонанса $\Delta H \approx 0,2$ э были получены в иттриевом феррите-гранате, свободном от примесей редкоземельных ионов.

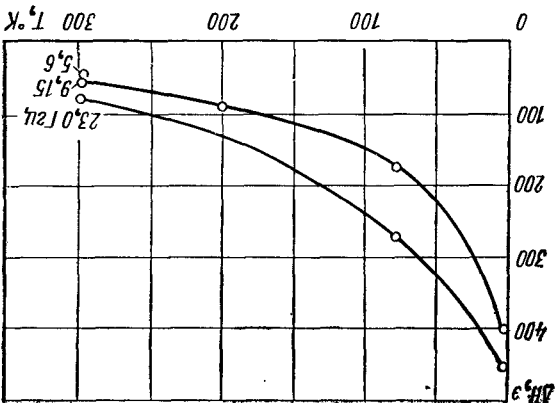


Рис. 29.10. Зависимость ширины резонансной кривой ΔH для марганец-цинкового феррита, содержащего небольшое (неизвестное) количество цинка от температуры [70]

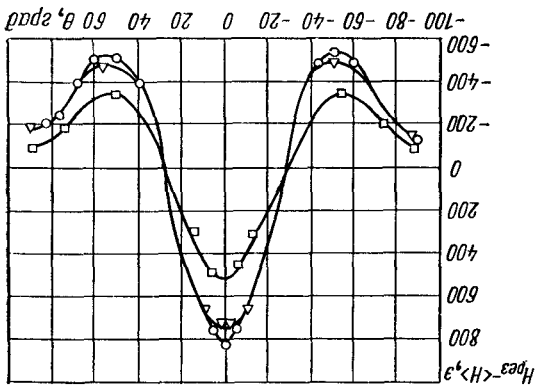


Рис. 29.11. Зависимость резонансного поля $H_{\text{рез}}$ от угла θ между направлением M и осью $[100]$ в плоскости (110) для монокристалла феррита $(\text{NiO})_{0.95}(\text{FeO})_{0.05}\text{Fe}_2\text{O}_3$ [18]:
 $\bigcirc$ — 4.2°K ; $\triangle$ — 300°K ; $\square$ — 180°
 $\langle H \rangle$ — усредненное значение $H_{\text{рез}}$ в интервале $0 - 180^\circ$

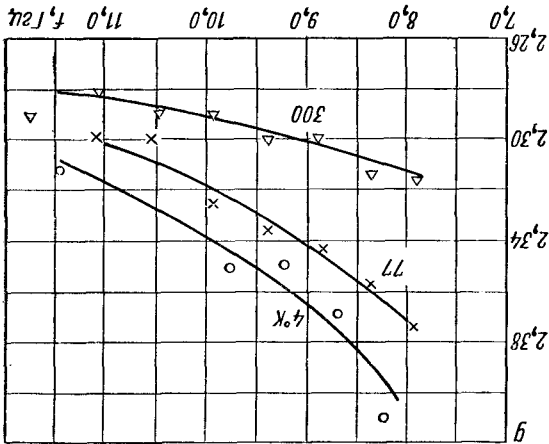


Рис. 29.12. Зависимость фактора спектроскопического расщепления g от частоты для монокристалла $(\text{NiO})_{0.95}(\text{FeO})_{0.05}\text{Fe}_2\text{O}_3$ [71]

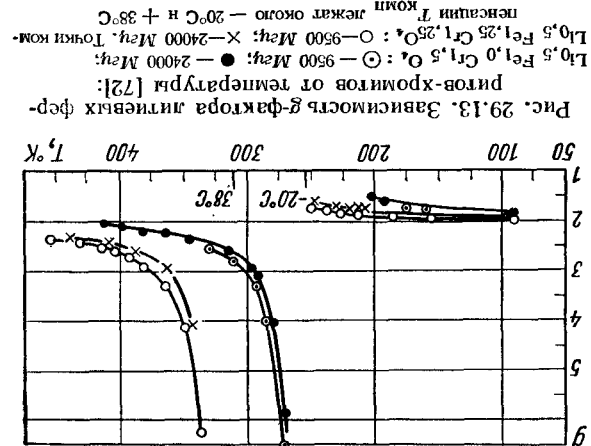


Рис. 29.13. Зависимость g -фактора литиевых ферритов-хромитов от температуры [72]:
 $\bigcirc$ — 38°K ; $\triangle$ — 20°K ; $\square$ — -20°K
 $T_{\text{ком}}$ — температура комп. лежат около -20°C и $+38^\circ \text{C}$
 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{1.0}\text{Cr}_{1.5}\text{O}_4$: $\bigcirc$ — 9500 Мгц ; $\triangle$ — 24000 Мгц . Точки комп.

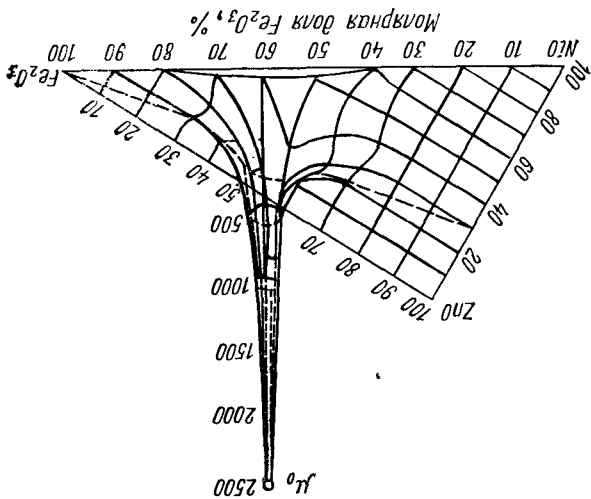


Рис. 29.14. Зависимость начальной магнитной проницаемости μ_0 ферритов в системе $\text{NiO} - \text{ZnO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$ от их состава [73]

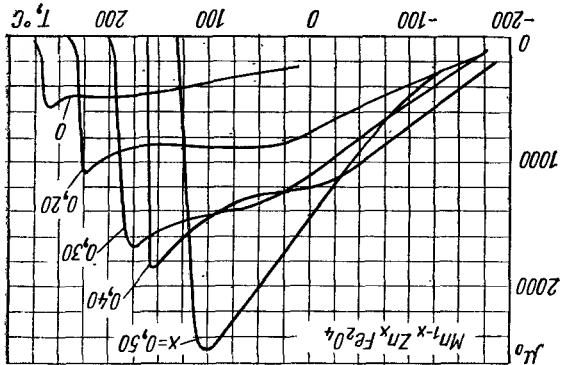


Рис. 29.15. Зависимость начальной магнитной проницаемости μ_0 смешанных марганец-цинковых ферритов от температуры [5]

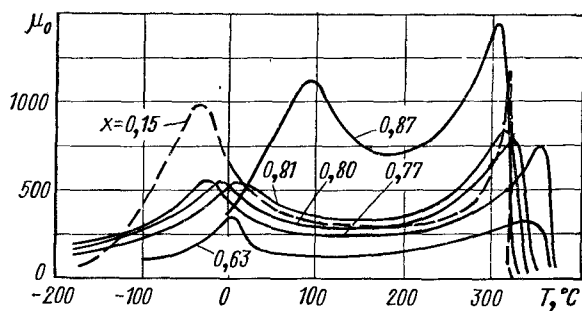


Рис. 29.16. Зависимость начальной магнитной проницаемости μ_0 от температуры для ферритов $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x^{2+}\text{Fe}_2\text{O}_4$ [74]

Сплошные кривые относятся к поликристаллическим образцам — пунктир — к монокристаллу. У некоторых марганец-железистых ферритов температурная зависимость μ_0 имеет два максимума: один около точки Кюри, другой — при более низких температурах (около 0°C). Наличие последнего обусловлено, вероятно, эффектом дезаккомодации

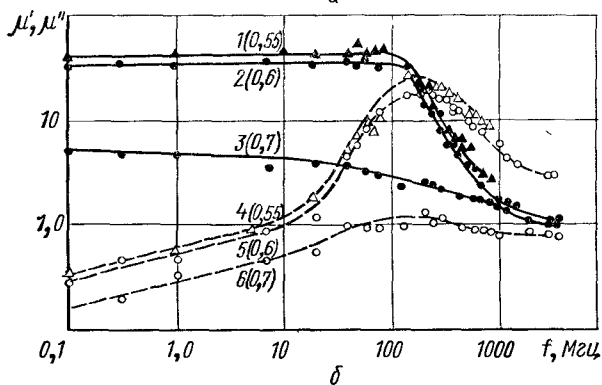
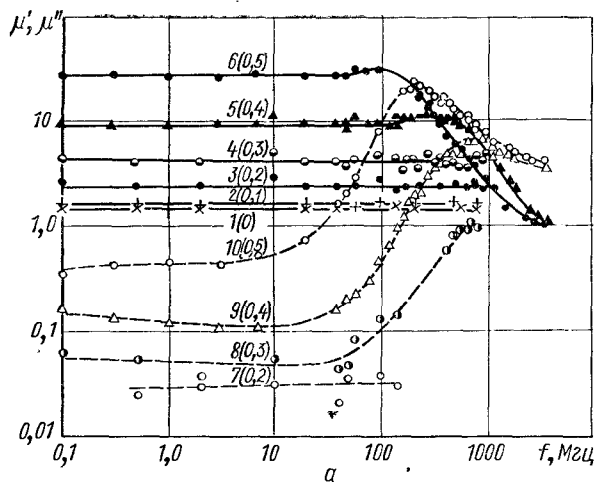


Рис. 29.17. Магнитные спектры кобальт-цинкового феррита $\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ [75]:

$a - 0 < x < 0.5$. Кривые 1—6 — $\mu'(f)$; 7—10 — $\mu''(f)$; 6 — $x > 0.5$. Кривые 1—3 — $\mu'(f)$; (4—6) — $\mu''(f)$. В скобках приведены значения x для каждой кривой

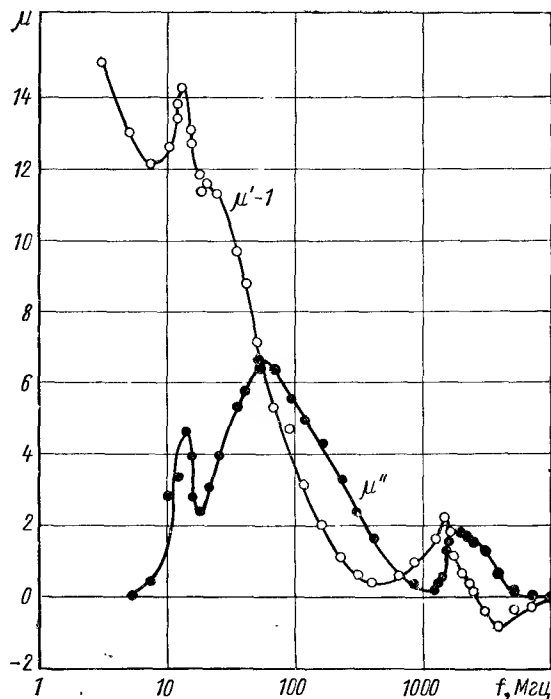


Рис. 29.18. Зависимость вещественной μ' и мнимой μ'' частей начальной магнитной проницаемости от частоты для поликристаллического феррита $(\text{MgO})_{0.81}(\text{FeO})_{0.19}\text{Fe}_2\text{O}_3$ при комнатной температуре [54] ($\rho = 3.68 \text{ г/см}^3$; $\sigma_s (26^\circ \text{C}) = 26.4 \text{ эс} \cdot \text{см}^3/\text{э}$)

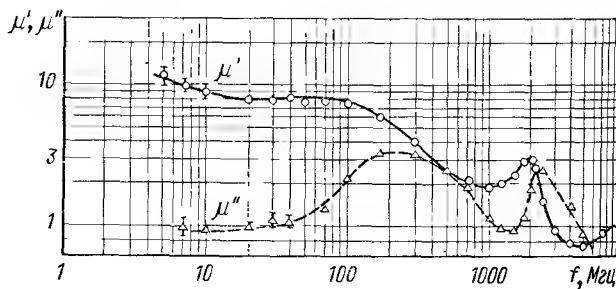


Рис. 29.19. Зависимость вещественной μ' и мнимой μ'' частей начальной магнитной проницаемости для поликристаллического феррита-алюмината $\text{NiMn}_{0.02}\text{Al}_{0.4}\text{Fe}_{1.6}\text{O}_4$ при комнатной температуре от частоты [64]

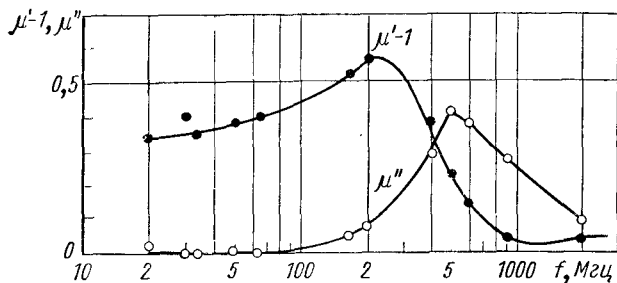


Рис. 29.20. Магнитный спектр поликристаллического литейного феррита-хромита $\text{Li}_{0,5}\text{Fe}_{1,0}\text{Cr}_{1,5}\text{O}_4$ [5]
($\sigma_s = 2,2 \text{ эс} \cdot \text{см}^3/\text{с}$; $\rho = 4,0 \text{ г/см}^3$)

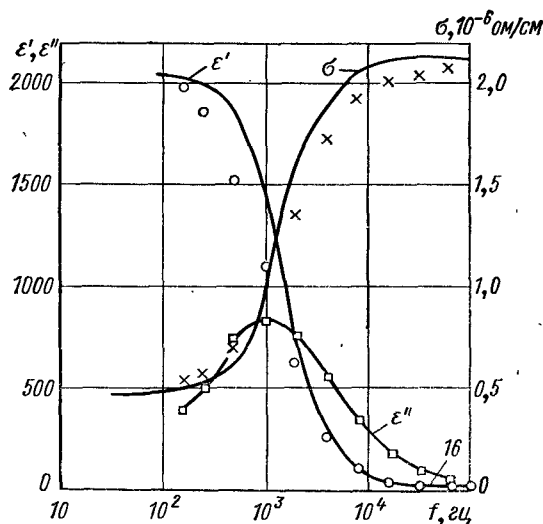


Рис. 29.22. Зависимость комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$ и удельной проводимости σ феррита $\text{Ni}_{0,4}\text{Zn}_{0,6}\text{Fe}_2\text{O}_4$ от частоты [77]

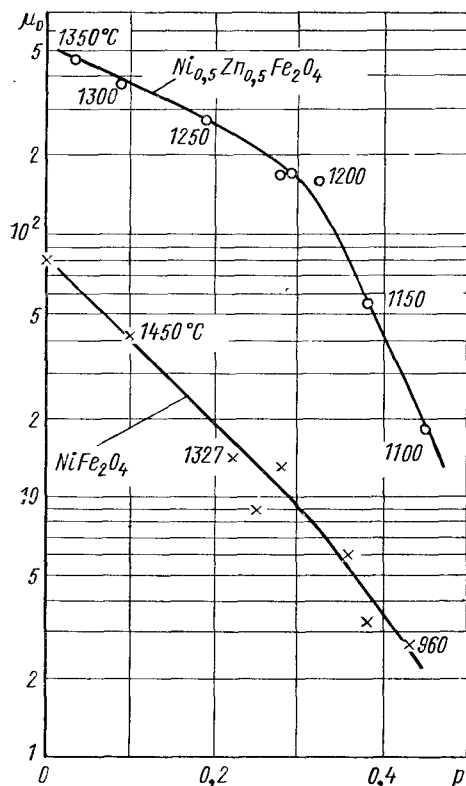


Рис. 29.21. Зависимость начальной проницаемости μ_0 от пористости p для поликристаллических образцов никелевого [79] и никель-цинкового [5] ферритов. Для $p = 0$ приведены результаты измерений на монокристалле никелевого феррита [76]. Пористость изменялась в результате изменения температуры спекания; последняя указана для каждого образца

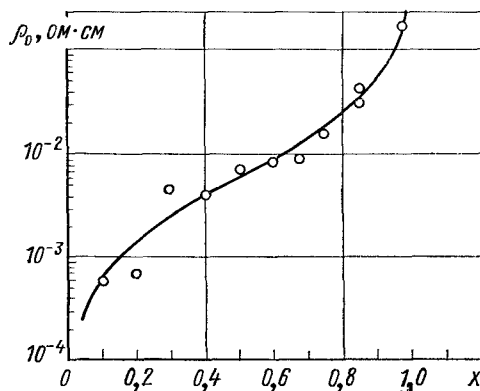


Рис. 29.23. Зависимость удельного сопротивления ρ_0 от состава ферритов типа $\text{Mn}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ [78]:

○ — экспериментальные значения ρ ; сплошная линия — $\rho = 6 \cdot 10^{-8} [x/(1-x)]$

Для теоретической интерпретации результатов по ферромагнитному резонансу и анизотропии редкоземельных ферритов-гранатов необходим одновременный учет расщепления уровней ионов за счет кристаллического поля, спин-орбитального и обменного взаимодействий, которые подчас являются величинами одного порядка. В настоящее время информация об электронных уровнях ионов редкоземельных элементов еще недостаточна для надежной теоретической интерпретации результатов.

Магнитострикция. Магнитострикционная деформация кристалла зависит от направления вектора намагниченности по отношению к кристаллографическим осям [90]. Обозначая направляющие косинусы вектора намагниченности α_i , можно представить относительное изменение длины $\delta l/l$ в кубическом кристалле в направлении, задаваемом косинусами β_i , в виде (29.5).

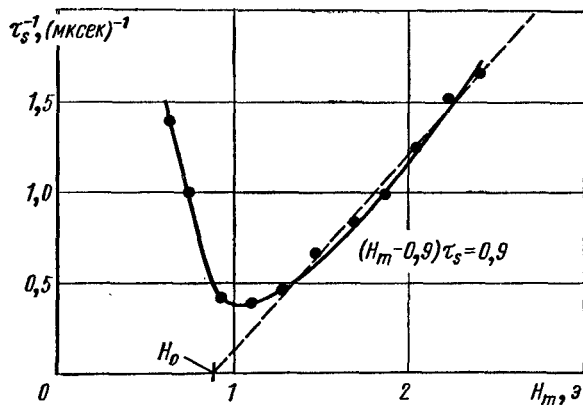


Рис. 29.24. Зависимость обратного времени переключения τ_s^{-1} от амплитуды перемагничивающего импульса H_m для феррита $\text{Mg}_{0,45}\text{Mn}_{0,55}^{2+}\text{Mn}_{0,23}^{3+}\text{Fe}_{1,77}\text{O}_4$ [67]. Напряженность порогового поля $H_0 = 0,9$ э. Константа переключения $s_W = 0,9$ э·мксек

Магнитострикция редкоземельных ферритов-гранатов линейно связана с концентрацией редкоземельных ионов и сильно возрастает при понижении температуры. Рекордные значения $\lambda_{111} = 2420 \cdot 10^{-6}$ и $\lambda_{100} = -1200 \cdot 10^{-6}$ в поле $H = 25$ кэ при $4,2^\circ$ К были получены в тербиевом феррите-гранате [91], что сравнимо по порядку величины с магнитострикцией редкоземельных металлов.

Упругие свойства и магнитоупругое взаимодействие. Магнитоакустические эффекты в гранатах возникают в результате взаимодействия между спинами магнитных ионов и упругими колебаниями кристаллической решетки, т. е. в результате тех же взаимодействий, которые определяют магнитострикционные эффекты. Выражение для упругой и магнитоупругой энергии можно записать в виде [93]:

$$E_y + E_{my} = \frac{1}{2} C_{11} (e_{xx}^2 + e_{yy}^2 + e_{zz}^2) + \frac{1}{4} C_{44} (e_{xy}^2 + e_{yz}^2 + e_{zx}^2) + C_{12} (e_{xx}e_{yy} + e_{yy}e_{zz} + e_{zz}e_{xx}) + B_1 (a_x^2 e_{xx} + a_y^2 e_{yy} + a_z^2 e_{zz}) + B_2 (a_x a_y e_{xy} + a_y a_z e_{yz} + a_z a_x e_{zx}),$$

где $C_{11} = c_{1111}$, $C_{12} = c_{1122}$, $C_{44} = c_{2323}$ — упругие константы, $B_1 = b_{1111}$, $B_2 = b_{2323}$ — магнитоупругие константы.

Условия для упругой и магнитоупругой изотропии следующие:

$$C_{11} - C_{12} = 2C_{44}; \quad B_1 = B_2.$$

Первое условие выполняется в иттриевом феррите-гранате с погрешностью до 5%. Значения констант, определяющих упругие и магнитоупругие свойства, приведены на с. 581

Оптические и магнитооптические свойства. Ферриты-гранаты обладают сравнительно высокой прозрачностью в ряде участков ближнего и далекого инфракрасного спектра [94]. Так, в иттриевом феррите-гранате имеются окна прозрачности при длинах волн $1 < \lambda < 0,1$ мкм и $1 < \lambda < 10$ мкм, между двумя этими областями наблюдается сильное решеточное поглощение. В редкоземельных ферритах-гранатах в первой области прозрачности могут наблюдаться поглощение при ферромагнитном резонансе (при большом поле анизотропии), обменном резонансе редкоземельной подрешетки в поле железных подрешеток, а также электронные переходы между уровнями основного мультиплета редкоземельных ионов [96]. Во второй области наблюдаются электронные переходы в редкоземельных ионах (при более коротких длинах волн) электронные переходы в ионах железа в октаэдрических и тетраэдрических позициях [97, 98]. Ферриты-гранаты в видимой и ближней инфракрасных областях спектра обнаруживают значительный эффект Фарадея [98, 99] при распространении света вдоль вектора намагниченности и примерно такой же по величине эффект Коттона — Мутона (магнитное линейное дупреломление) при распространении света перпендикулярно вектору намагниченности [100, 101].

Кристаллографические и другие характеристики

Таблица 29.11

Кристаллографические позиции в структуре граната [102]

Кристаллографические характеристики	Типичная идеальная формула			
	{Ca ₃ }	{Al ₂ }	{Si ₃ }	O ₁₂
Точечная симметрия	222	$\bar{3}$	$\bar{4}$	$\bar{1}$
Позиция пространственной группы	24 c	16 a	24 d	96
Кислородная координация	8	6	4	—
Вид кислородного окружения	Додекаэдр (искаженный куб)	Октаэдр	Тетраэдр	—

Таблица 29.12

Распределение катионов по подрешеткам в структуре граната [102]

(в скобках указан ионный радиус, Å [103])

Период	Октаэдрическая подрешетка (16 a)	Тетраэдрическая подрешетка (24 d)	Додекаэдрическая подрешетка (24 c)
1A	—	Li ⁺ (0,68)	Na ⁺ (0,98)
1B	—	—	Cu ²⁺ (0,80)

Периоды	Октаэдрическая подрешетка (16 а)	Тетраэдрическая подрешетка (24 d)	Додекаэдрическая подрешетка (24 с)
IIA	Mg ²⁺ (0,74)	—	Mg ²⁺ , Ca ²⁺ (1,04), Sr ²⁺ (1,20), Ba ²⁺ (1,38)
IIB	Zn ²⁺ (0,83)	—	Zn ²⁺ , Cd ²⁺ (0,99)
IIIA	Al ³⁺ (0,57), Ga ³⁺ (0,62), In ³⁺ (0,92)	Al ³⁺ , Ga ³⁺	—
IIIB	Sc ³⁺ (0,83)	—	Y ³⁺ (0,97) и все ионы редкоземельных элементов, кроме Ce ³⁺
IVA	Si ⁴⁺ (0,39), Ge ⁴⁺ (0,44), Sn ⁴⁺ (0,67)	Si ⁴⁺ , Ge ⁴⁺ , Sn ⁴⁺	—
IVB	Ti ⁴⁺ (0,64), Zr ⁴⁺ (0,82), Hf ⁴⁺ (0,82)	Ti ⁴⁺	—
VA	Sb ⁵⁺ (0,62)	P ⁵⁺ (0,35), As ⁵⁺ (0,47)	Bi ³⁺ (1,20)
VB	Nb ⁵⁺ (0,66), Ta ⁵⁺ (0,66)	V ⁵⁺ (0,40)	—
VIB	Cr ³⁺ (0,64)	—	Cr ²⁺ (0,83)
VIIB	Mn ²⁺ (0,91)	—	Mn ²⁺
VIII	Fe ³⁺ (0,67), Co ²⁺ (0,78), Ni ²⁺ (0,74), Ru ⁴⁺ (0,62)	Fe ³⁺ , Ru ⁴⁺	Fe ²⁺ (0,80)

Таблица 29.13

Расстояния между ионами в иттрий-железистом гранате (ИЖГ) Y₃Fe₅O₁₂ [104]

Числа в скобках указывают количество связей

Ион	Расстояние между ионами, Å
Y ³⁺ (24 с)	(4) Fe ³⁺ (16 а) 3,46 (6) Fe ³⁺ (24 d): 3,09 (2); 3,79 (4) (8) O ²⁻ : 2,37 (4); 2,43 (4)
Fe ³⁺ (16 а)	(2) Y ³⁺ (24 с) 3,46 (6) Fe ³⁺ (24 d) 3,46 (6) O ²⁻ 2,0
Fe ³⁺ (24 d)	(6) Y ³⁺ (24 с): 3,09 (2); 3,79 (4) (4) Fe ³⁺ (16 а) 3,46 (4) Fe ³⁺ (24 d) 3,79 (4) O ²⁻ 1,88
O ²⁻	(2) Y ³⁺ (24 с) 2,37; 2,43 (1) Fe ³⁺ (16 а) 2,00 (1) Fe ³⁺ (24 d) 1,88 (9) O ²⁻ : 2,68 (2); 2,81; 2,87; 2,96; 2,99 (2); 3,16 (2).

Таблица 29.14

Углы связи катион—анион—катион в ИЖГ [104]

Связь	Угол связи, град	Связь	Угол связи, град
Fe(a)—O—Fe(d)	126,6	Fe(a)—O—Fe(a)	147,2
Fe(a)—O—Y(c)	102,8	Fe(d)—O—Fe(d)	86,6
Fe(a)—O—Y(c)	104,7	Fe(d)—O—Fe(d)	78,8
Fe(d)—O—Y(c)	122,2	Fe(d)—O—Fe(d)	74,7
Fe(d)—O—Y(c)	92,2	Fe(d)—O—Fe(d)	74,6
Y(c)—O—Y(c)	104,7		

Таблица 29.15

Диэлектрические свойства ИЖГ

Параметр	Значение	f, Гц	Примечание	Литература
ε'	12	0,02	Обжиг при 1350—1450°C в атмосфере O ₂	[105]
	10	3,00—9,24	Обжиг при 1380°C	[106]
ε''	0,0015	9,24	Обжиг при 1380°C Концентрация Мп 1—2%	[106]
	0,008	9,24	Обжиг при 1200°C Концентрация Сп 2%	[106]
tg δ	0,002	3,00—9,24	Обжиг при 1380°C	[106]
	0,002	10	Обжиг при 1400°C	[107]
	0,003	0,02	Обжиг при 1300—1500 °C в O ₂	[108]

Электронные конфигурации, основные термы, валентности и ионные радиусы редкоземельных элементов, скандия и иттрия

Элемент	Электронная конфигурация атома	Возможные валентности	Электронная конфигурация трехвалентного иона	Основной терм трехвалентного иона	Радиус трехвалентного иона*	
					[109]	[103]
La	$5d^1 6s^2$	3	$5p^6$	$1S_0$	—	1,04
Ce	$4f^1 5d^1 6s^2$	3 (4)	$4f^1$ (Ce $^{3+}$)	$2F_{5/2}$	—	1,02
Pr	$4f^3 6s^2$	3 (4)	$4f^2$ (Pr $^{3+}$)	$3H_4$		1,00
Nd	$4f^4 6s^2$	3	$4f^3$	$4I_{9/2}$	1,18	0,99
Pm	$4f^5 6s^2$	—	$4f^4$	$5I_4$	—	0,98
Sm	$4f^6 6s^2$	2 (3)	$4f^5$ (Sm $^{3+}$)	$6H_{5/2}$	1,136	0,97
Eu	$4f^7 6s^2$	2 (3)	$4f^6$ (Eu $^{3+}$)	$7F_0$	1,133	0,97
Gd	$4f^7 5d^1 6s^2$	3	$4f^7$	$8S_{7/2}$	1,11	0,94
Tb	$4f^8 5d^1 6s^2$	3 (4)	$4f^8$ (Tb $^{3+}$)	$7F_6$	1,09	0,89
Dy	$4f^{10} 6s^2$	3	$4f^9$	$6H_{15/2}$	1,07	0,88
Ho	$4f^{11} 6s^2$	3	$4f^{10}$	$5I_8$	1,05	0,86
Er	$4f^{12} 6s^2$	3	$4f^{11}$	$4I_{15/2}$	1,033	0,85
Tm	$4f^{13} 6s^2$	3	$4f^{12}$	$3H_6$	1,02	0,85
Yb	$4f^{14} 6s^2$	2 (3)	$4f^{13}$ (Yb $^{3+}$)	$2F_{7/2}$	1,00	0,81
Lu	$4f^{14} 5d^1 6s^2$	3	$4f^{14}$	$1S_0$	0,99	0,80
Sc	$3d^1 4s^2$	3	$3p^6$	$1S_0$	—	0,83
Y	$4d^1 5s^2$	3	$4p^6$	$1S_0$	1,05	0,97

* Рассчитано по отношению к кислороду, радиус которого принят равным 1,36 Å.

Магнитные свойства

Таблица 29.17

Магнитные свойства ИЖГ и редкоземельных ферритов-гранатов

Соединение	T_C , °K	$T_{\text{КОМП}}$, °K	Намагниченность насыщения				Литература
			$\mu_B \cdot \mu_B$		$4\pi M_s$, эс		
			0°K	300°K	0°K	300°K	
$\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	545; 560	—	5,0	3,7	2470	1800	[113—115]
$\text{La}_{0,4} \text{Y}_{2,6} \text{Fe}_5\text{O}_{12}$	—	—	5,0	—	2400	—	[115]
$\text{PrY}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	—	—	6,0	—	2900	1900	[115]
$\text{Nd}_{1,5} \text{Y}_{1,5} \text{Fe}_5\text{O}_{12}$	—	—	7,0	—	3050	—	[112]
$\text{Sm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	578	—	5,43	3,7	2600	1770	[114, 115]
$\text{Eu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	566	—	2,78	2,45	1320	1160	[114, 115]
$\text{Gd}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	564	286	16,0	—	7250	—	[114, 115]
$\text{Tb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	568	246	18,2	0,7	8800	340	[111, 114]
$\text{Dy}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	563	226	16,9	0,9	8200	440	[111, 114]
$\text{Ho}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	567	137	15,2	1,5	7400	740	[111, 114]
$\text{Er}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	556	83	10,2	2,0	—	1300	[111, 114]
$\text{Tm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	549	—	1,2	2,8	—	—	[111, 114]
$\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	548	0	0	3,2	—	1640	[111, 114]
$\text{Lu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	549	—	5,02	3,6	2500	1800	[111, 114]

Таблица 29.18

Константы анизотропии ИЖГ и редкоземельных ферритов-гранатов

Соединение	Константы анизотропии, 10^8 эрг/см^3		Литература
	$-K_1$	$-K_2$	
$\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	6,2 (300°K); 24,5 (0°K)	—	[116, 117]
$\text{Sm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	19,8 (300°K)	—	[117, 118]
$\text{Eu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	3 (300°K)	—	[119]
$\text{Gd}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	250 (0°K)	—	[117]
$\text{Tb}_{0,0057}\text{Y}_{2,9943}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	—88 (20°K)	460 (20°K)	[120]
$\text{Tb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	760 (80°K)	7600 (80°K)	[118]
$\text{Dy}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	970 (80°K)	—214	[118]
$\text{Ho}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	800 (80°K)	270	[118]
$\text{Er}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	7 (300°K); 22 (100°K)	—	[117, 118]
$\text{Tm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	11 (300°K); 210 (77°K)	100 (77°K)	[121]
$\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	4 (300°K); 170 (77°K)	—	[117]
	6 (300°K); 40 (77°K)		[118]

Таблица 29.19

Параметры элементарной ячейки и плотность ИЖГ и редкоземельных ферритов-гранатов

Гранат	Параметр ячейки, Å	ρ , г/см ³	Литература
Y ₃ Fe ₅ O ₁₂	12,376	5,17	[110]
La _{0,4} Y _{2,6} Fe ₅ O ₁₂	12,428	5,24	[111]
PrY ₂ Fe ₅ O ₁₂	12,466	5,42	[111]
Nd _{1,5} Y _{1,5} Fe ₅ O ₁₂	12,488	5,60	[112]
Sm ₃ Fe ₅ O ₁₂	12,529	6,23	[110]
Eu ₃ Fe ₅ O ₁₂	12,498	6,31	[110]
Gd ₃ Fe ₅ O ₁₂	12,471	6,46	[110]
Tb ₃ Fe ₅ O ₁₂	12,436	6,55	[110]
Dy ₃ Fe ₅ O ₁₂	12,405	6,61	[110]
Ho ₃ Fe ₅ O ₁₂	12,375	6,77	[110]
Er ₃ Fe ₅ O ₁₂	12,347	6,87	[110]
Tm ₃ Fe ₅ O ₁₂	12,323	6,94	[110]
Yb ₃ Fe ₅ O ₁₂	12,302	7,06	[110]
Lu ₃ Fe ₅ O ₁₂	12,283	7,14	[110]

Таблица 29.22

Постоянная элементарной ячейки и плотность редкоземельных галлатов [125] и алюминатов [109] со структурой граната

Соединение	a , Å	ρ , г/см ³
Y ₃ Ga ₅ O ₁₂	12,30	5,73
Pr ₃ Ga ₅ O ₁₂	12,57	6,40
Nd ₃ Ga ₅ O ₁₂	12,50	6,57
Sm ₃ Ga ₅ O ₁₂	12,42	6,58
Gd ₃ Ga ₅ O ₁₂	12,39	7,02
Dy ₃ Ga ₅ O ₁₂	12,32	7,25
Er ₃ Ga ₅ O ₁₂	12,25	7,49
Y ₃ Al ₅ O ₁₂	12,02	4,50
Gd ₃ Al ₅ O ₁₂	12,11	5,95
Dy ₃ Al ₅ O ₁₂	12,06	6,15
Er ₃ Al ₅ O ₁₂	11,98	6,37

Таблица 29.20

Расчетные значения момента насыщения (M_0) ионов редкоземельных элементов в структуре граната и соответствующие расчетные $M_{\text{расч}}$ и измеренные $M_{\text{эксп}}$ в поле 200 кЭ значения момента на молекулу $5 \text{ Fe}_2\text{O}_3 \times 3\text{M}_2\text{O}_3$ [122]

Момент насыщения	Редкоземельный ион					
	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb
M_0 , μ_B	$6,8 \pm 0,2$	$7,92 \pm 0,25$	$6,8 \pm 0,2$	$6,8 \pm 0,2$	$5,1 \pm 0,1$	$1,7 \pm 0,04$
$M_{\text{расч}}$, μ_B	$30,8 \pm 1,2$	$37,52 \pm 1,5$	$30,8 \pm 1,2$	$30,8 \pm 1,2$	$20,6 \pm 0,6$	$0,2 \pm 0,24$
$M_{\text{эксп}}$, μ_B	$30,3 \pm 0,3$	$31,4 \pm 0,3$	$32,5 \pm 0,3$	$27,5 \pm 0,3$	$23,1 \pm 0,3$	$0 \pm 0,3$

Таблица 29.21

Ширина линии ферромагнитного резонанса ΔH , э, в некоторых редкоземельных ферритах со структурой граната [123]

T , °K	Sm ₃ Fe ₅ O ₁₂		Gd ₃ Fe ₅ O ₁₂		Er ₃ Fe ₅ O ₁₂		Yb ₃ Fe ₅ O ₁₂	
	[100]	[111]	[100]	[111]	[100]	[111]	[100]	[111]
393	—	—	—	—	—	—	198	242
298	2400	2400	—	—	874	1180	203	304
195	3500	5000	96,5	206	1980	4400	261	1400
77	Не наблюдается	—	125	170	Не наблюдается	Не наблюдается	1000	5000

Таблица 29.23

Магнитные свойства гранатов (5-x) $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{Me}_2\text{O}_3 \times$
 $\times 3\text{Y}_2\text{O}_3$ [126, 127]
 $\text{Me:Ga}^{3+}, \text{Al}^{3+}, \text{Sc}^{3+}, \text{In}^{3+} \text{ и } \text{Cr}^{3+}$

$x \text{ Me}_2\text{O}_3$	n_B (0°K), °B	$T_{\text{снabl}}$, °K	$T_{\text{срасч}}$, °K	$f_{\text{терр}}$
0	9,92	545	545	0
$1/4 \text{ Ga}_2\text{O}_3$	7,95	519	524	0,91
$3/4 \text{ Ga}_2\text{O}_3$	4,35	460	477	0,88
$1/3 \text{ Al}_2\text{O}_3$	7,00	497	518	0,95
$1 \text{ Al}_2\text{O}_3$	3,25	415	451	0,84
$1/4 \text{ Sc}_2\text{O}_3$	11,97	500	504	0,11
$3/4 \text{ Sc}_2\text{O}_3$	14,4	365	427	0,21
$1/2 \text{ In}_2\text{O}_3$	13,8	444	462	0,11
$1/4 \text{ Cr}_2\text{O}_3$	10,95	515	—	0,00

Таблица 29.24

Положение низкотемпературного максимума ширины
 линии ферромагнитного резонанса в $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ с при-
 месью ионов редкоземельных элементов [124]

Ион	$T_{\Delta H_{\text{макс}}}$, °K			Частота, Гц
	[100]	[110]	[111]	
Pr	37	40	42	9,2
Nd	28	50	43	9,2
Pm	—	—	—	—
Sm	42	—	—	23
Eu	—	—	—	—
Gd	—	—	—	—
Tb	90	90	90	20,8
Dy	50	55	52	20,8
Ho	—	—	65	9,2
Er	60	—	—	23,8
Tm	61	—	—	9,2
Yb	90	145	145	20,8

Таблица 29.25

Зависимость намагниченности насыщения и точки
 Кюри феррита-граната $\text{Gd}_3\text{Fe}_{5-x}\text{Al}_x\text{O}_{12}$ от содержания Al
 [128]

x	n_B (0°K), °B	T_C , °K	x	n_B (0°K), °B	T_C , °K
0,50	17,7	500	2,50	18,2	175
1,00	19,2	430	3,00	16,4	88
1,50	20,1	345	3,50	14,9	30
2,00	19,3	253			

Таблица 29.26

Зависимость намагниченности насыщения,
 температуры компенсации и точки Кюри феррита-
 граната $\text{Gd}_3[\text{Fe}_{2-x}\text{Sc}_x]\text{Fe}_3\text{O}_{12}$ от содержания Sc [128]

x	n_B (0°K), °B	$T_{\text{комп}}$, °K	T_C , °K	x	n_B (0°K), °B	$T_{\text{комп}}$, °K	T_C , °K
0,00	16,0	286	546	1,00	11,2	137	300
0,25	14,9	223	223	1,25	8,6	127	216
0,50	13,7	182	182	1,50	6,0	Нет	30
0,75	12,6	157	—				

Таблица 29.27

Зависимость точки Кюри и низкочастотной относитель-
 ной начальной проницаемости при различных
 температурах от содержания Sc в гранате
 $\text{Y}_3\text{Sc}_x\text{Fe}_{2-x}\text{Fe}_3\text{O}_{12}$ [129]

x	T_C , °K	μ_0		
		300°K	195°K	77°K
0,0	560	112	73	48,5
0,4	485	345	184	142
0,6	425	604	290	197
0,7	400	814	372	230
0,8	375	1080	494	272
0,9	340	1934	700	360
1,0	320	1	1114	491
1,5	200	1	1	1

Таблица 29.28

Постоянная решетки a и намагниченность
 насыщения n_B некоторых гранатов, содержащих ионы
 Si^{4+} , Ge^{4+} и Sn^{4+} [130]

Состав граната	a , Å	n_B °B (0°K)
$(1/3)\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} - (2/3)\text{Y}_3\text{Fe}_2\text{Fe}_3\text{O}_{12}$	12,290	0,5
$(1/3)\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12} - (2/3)\text{Y}_3\text{Fe}_2\text{Fe}_3\text{O}_{12}$	12,370	1,5
$(1/3)\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Sn}_3\text{O}_{12} - (2/3)\text{Y}_3\text{Fe}_2\text{Fe}_3\text{O}_{12}$	12,502	5,2
$(1/3)\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} - (2/3)\text{Gd}_3\text{Fe}_2\text{Fe}_3\text{O}_{12}$	12,36	13,5
$(1/5)\text{Ca}_3\text{Al}_5\text{Si}_3\text{O}_{12} - (4/5)\text{Y}_3\text{Fe}_2\text{Fe}_3\text{O}_{12}$	12,35	1,4
$(1/5)\text{Ca}_3\text{Al}_5\text{Si}_3\text{O}_{12} - (4/5)\text{Gd}_3\text{Fe}_2\text{Fe}_3\text{O}_{12}$	12,402	14,2
$\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$	12,312	—
$\text{Mn}_3\text{Fe}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$	12,087	—
$\text{Mn}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	11,87	—
$\text{Gd}_3\text{Co}_2\text{GaGe}_2\text{O}_{12}$	12,446	—
$\text{Gd}_3\text{Ni}_2\text{GaGe}_2\text{O}_{12}$	12,401	—

Таблица 29.29

Магнитные свойства гранатов типа
 $x\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Sn}_3\text{O}_{12} - (1-x)\text{Y}_3\text{Fe}_2\text{Fe}_3\text{O}_{12}$ [131]

x	a , Å	n_B , μ_B при 0°K	T_C , °K	x	a , Å	n_B , μ_B при 0°K	T_C , °K
0	12,376	5,0	545	5/12	12,530	2,9	220
1/12	12,407	6,25	498	1/2	12,558	1,2	—
1/6	12,440	7,1	400	2/3	12,620	0,25	—
1/3	12,502	5,2	260	1,0	12,728	—	—

Таблица 29.30

Магнитные свойства феррита-граната
 $\{\text{Y}_{3-x}\text{Ca}_x\} [\text{Zr}_x\text{Fe}_{2-x}] (\text{Fe}_3)\text{O}_{12}$ [132]

x	a , Å	n_B набл*, μ_B	n_B расч., μ_B	T_C расч., °K	T_C набл., °K
0	12,376	5,0	5,0	545	545
0,2	12,404	5,9	5,94	—	510
0,4	12,434	6,7	6,59	—	469
0,6	12,463	7,2	6,75	400	421
0,8	12,501	6,8	6,31	—	366
0,9	12,516	—	—	—	—
1,0	12,535	5,3	5,31	—	306
1,2	12,572	3,4	3,87	180	241
1,3	12,583	—	—	—	—
1,4	12,594	2,0	2,22	—	173
1,6	12,630	1,2	0,71	—	105
2,0	12,684	1,7	0,00	—	—

* n_B набл. получено при экстраполяции $T \rightarrow 0^\circ\text{K}$, $H \rightarrow \infty$.

Таблица 29.31

Свойства гранатов с титаном и рутением [133, 134]

Соединение	x	a	n_B , μ_B	
			$T=0^\circ\text{K}$	$T=300^\circ\text{K}$
$\text{Y}_{3-x}\text{Ca}_x\text{Ti}_x\text{Fe}_{5-x}\text{O}_{12}$	0,20	12,382	—	—
	0,40	12,390	5,64	—
	0,65	12,398	5,89	3,1
$\text{Y}_{3-x}\text{Ca}_x\text{Ru}_x\text{Fe}_{5-x}\text{O}_{12}$	0,20	12,383	5,24	—

Таблица 29.32

Магнитные свойства гранатов
 $\{\text{Bi}_x\text{Y}_{3-x}\}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ [135]

x	T_C , °K	n_B (1,4°K), μ_B	n_B (300°K), μ_B
0,25	—	4,97	3,67
0,75	—	5,04	3,75
1,00	591	5,02	3,78

Таблица 29.33

Параметр элементарной ячейки и магнитные свойства ферритов-гранатов,
содержащих V^{5+} , Sb^{5+}

Феррит-гранат	x	a , Å	T_C , °K	n_B (0°K), μ_B
$\{\text{Y}_{3-2x}\text{Ca}_x\} [\text{Fe}_2] (\text{Fe}_{3-x}\text{V}_x)\text{O}_{12}$ [136]	0,00	12,376	557	5,00
	0,40	12,400	563	—
	0,80	12,422	548	1,00
	1,25	12,449	523	—1,23
	1,50	12,465	493	—2,30
$\{\text{Y}_{3-2x}\text{Ca}_x\} [\text{Fe}_{2-x}\text{Sb}_x] (\text{Fe}_3)\text{O}_{12}$ [137]	0,50	12,446	—	7,25
	0,60	12,460	—	7,52
	0,70	12,473	—	7,10
	1,00	12,514	—	4,25
	1,50	12,580	—	0,4
$\{\text{Ca}_3\} [\text{Sb}_x\text{Fe}_{2-x}] (\text{Fe}_{1,5-x}\text{V}_{1,5+x})\text{O}_{12}$ [128]	0,00	12,465	—	—2,30
	0,30	12,487	—	0,51
	0,50	12,502	—	1,65
	0,75	12,523	—	2,5
	1,50	12,580	—	0,4

Таблица 29.34

Константы магнитострикции λ_{100} и λ_{111}
ферритов-гранатов [138]

Феррит-гранат	$\lambda_{100}, 10^{-6}$			$\lambda_{111}, 10^{-6}$		
	78°K	196°K	297°K	78°K	196°K	297°K
$Y_3Fe_5O_{12}$	-1,0	-1,1	-1,4	-3,6	-3,9	-2,4
$Sm_3Fe_5O_{12}$	159	49	21	-183	-28,1	-8,5
$Eu_3Fe_5O_{12}$	86	51	21	9,7	5,3	1,8
$Gd_3Fe_5O_{12}$	4,0	1,7	0	-5,1	-4,5	-3,1
$Tb_3Fe_5O_{12}$	67	-10,3	-3,3	560	65	12
$Dy_3Fe_5O_{12}$	-169	-46,6	-12,5	-145	-21,6	-5,9
$Ho_3Fe_5O_{12}$	-82,2	-10,6	-3,4	-56,3	-7,4	-4,0
$Er_3Fe_5O_{12}$	10,7	4,1	2,0	-19,4	-8,8	-4,9
$Tm_3Fe_5O_{12}$	25	4,9	1,4	-31,2	-11,3	-5,2
$Yb_3Fe_5O_{12}$	18,3	5,0	1,4	-14,4	-7,1	-4,5

Упругие [139] и магнитоупругие [140] константы ИЖГ при комнатной температуре: $C_{11} = 23,9 \cdot 10^{11}$ дин/см²; $C_{12} = 10,77 \cdot 10^{11}$ дин/см²; $C_{44} = 7,64 \cdot 10^{11}$ дин/см²;

$b_1 = 3,48 \cdot 10^6$ эрг/см³; $b_2 = 6,96 \cdot 10^6$ эрг/см³.

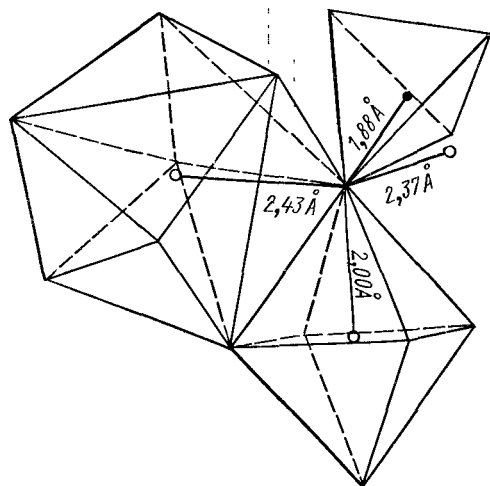


Рис. 29.25. Схема структуры иттриевого феррита-граната [127]. Показаны расстояния металлических ионов каждого типа от общего для всех ближайшего иона кислорода

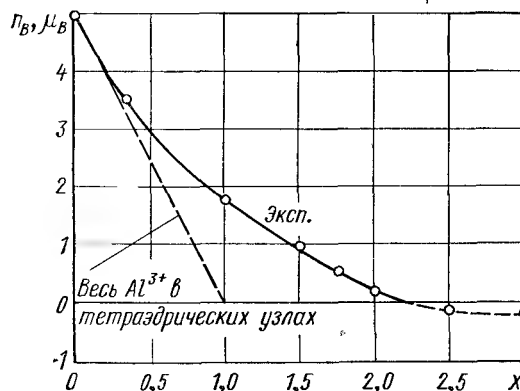


Рис. 29.27. Зависимость спонтанного момента от состава для граната $Y_3Fe_{5-x}Al_xO_{12}$. Намагниченность для граната $Y_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$ почти совпадает с кривой для $Y_3Fe_{5-x}Al_xO_{12}$ вплоть до значения $x = 1,6$, до которого было проведено измерение [153] (см. также рис. 29.28)

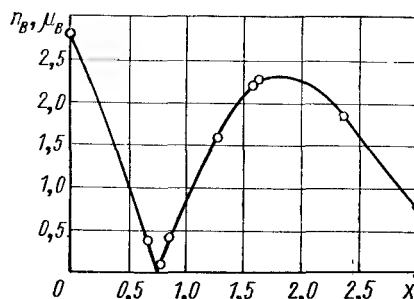


Рис. 29.28. Намагниченность насыщения на формульную единицу граната $Eu_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$. Намагниченность измерялась на свободной сфере из монокристалла и экстраполирована к $H = 0$ [141]

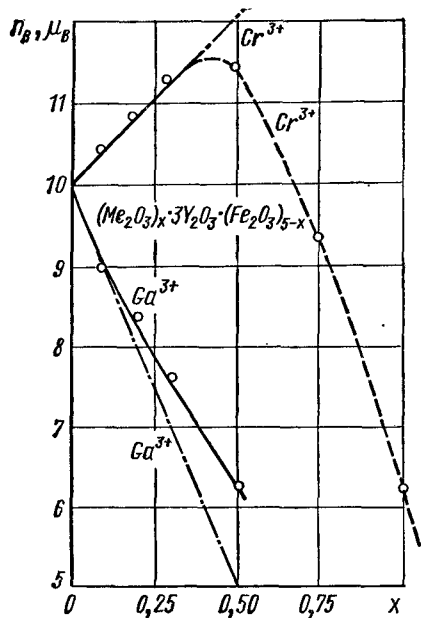


Рис. 29.29. Зависимость намагниченности насыщения n_B ($0^\circ K$) на молекулу в феррите-гранате иттрия от содержания x ионов Ga^{3+} и Cr^{3+} [127] (— теория)

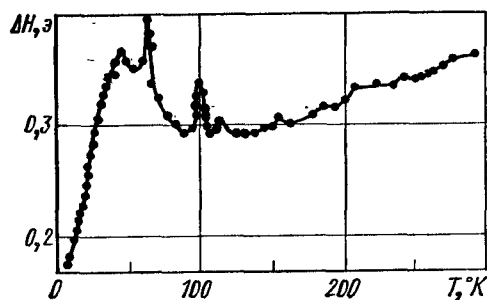


Рис. 29.30. Зависимость ширины резонансной кривой от температуры монокристалла иттриевого граната, выращенного из специальной окиси иттрия, содержащей менее $10^{-4}\%$ остаточных примесей редкоземельных элементов [142]

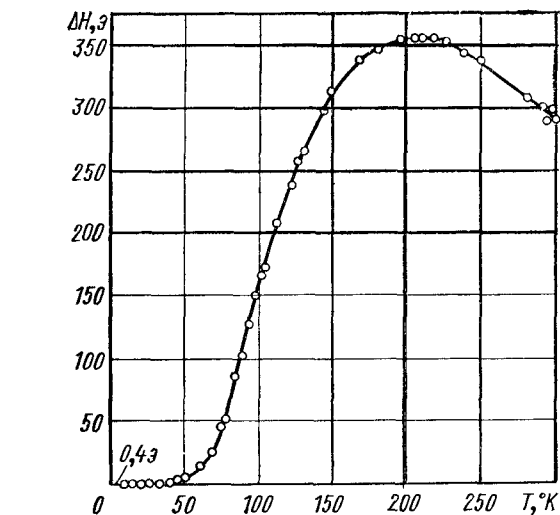
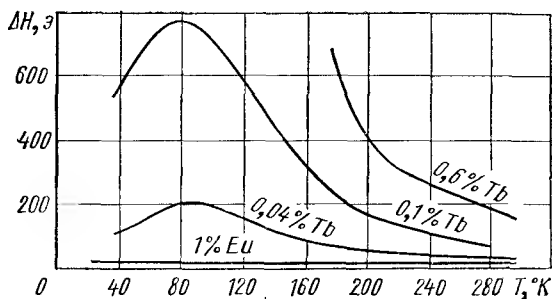


Рис. 29.31. Зависимость ширины резонансной кривой от температуры монокристалла европиевого феррита-граната $Eu_3Fe_5O_{12}$ [143]

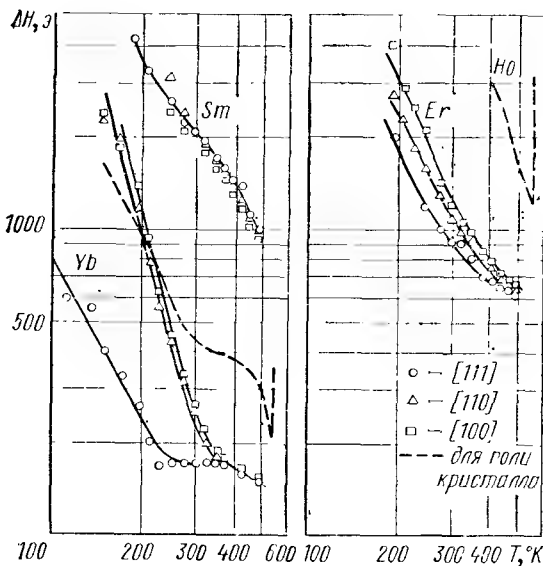


Рис. 29.32. Зависимость ширины резонансной кривой для ферритов-гранатов самария, иттербия, эрбия и гольмия от температуры [123]

Рис. 29.33. Зависимость ширины резонансной кривой от температуры для монокристалла иттриевого граната с примесью тербия и европия [144]

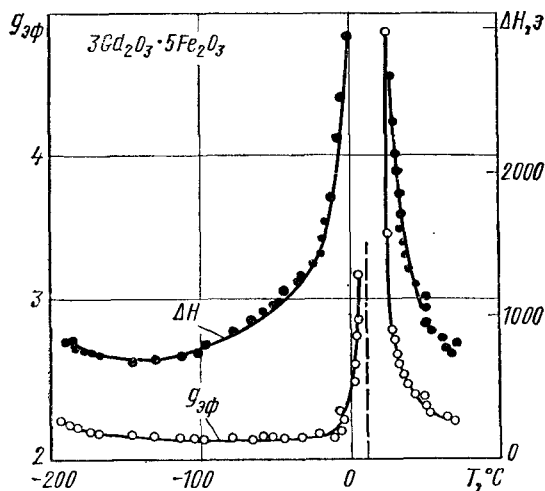


Рис. 29.34. Зависимости эффективного значения g -фактора и ширины резонансной кривой для случая ферромагнитного резонанса в гадолиниевом гранате вблизи $T_{\text{комп}}$ от температуры [145]. Данные получены на поликристаллическом сферическом образце при частоте 9479 МГц

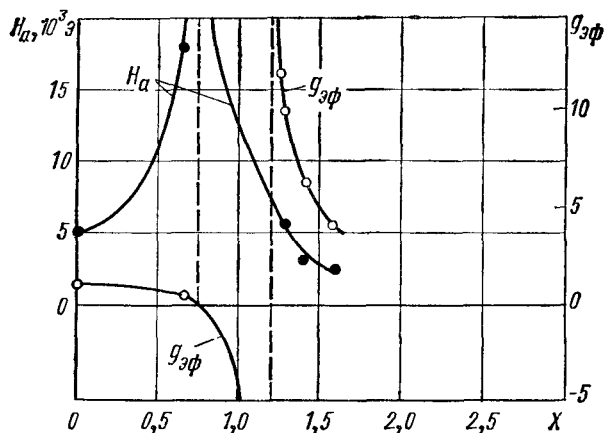


Рис. 29.36. Значения эффективного g -фактора и поля анизотропии H_a при 4,2° К вдоль направления [111] ($H_a \cong 4K_1/3M_s$) в зависимости от содержания галлия в гранате $\text{Eu}_3\text{Fe}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}$ [141]

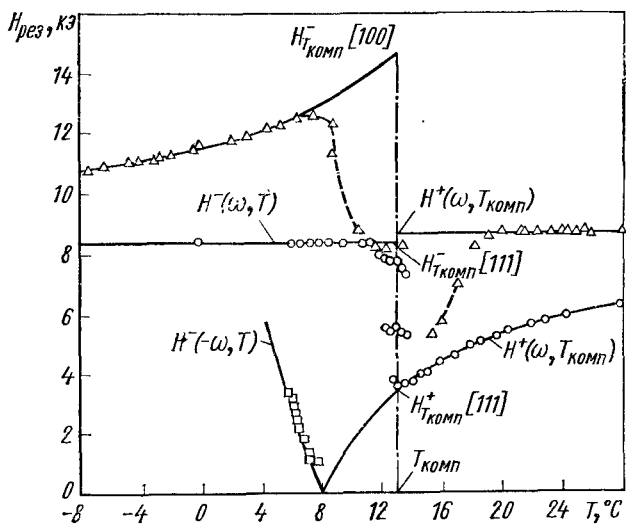


Рис. 29.35. Экспериментальные зависимости резонансного поля для случая обменного резонанса в гадолиниевом гранате вблизи точки магнитной компенсации $T_{\text{комп}}$ от температуры [146].

Самая нижняя кривая соответствует случаю, когда магнитное поле направлено вдоль легкой оси. Данные получены на монокристаллических сферических образцах при частоте 24·10³ МГц. Ориентация: ○ — вдоль [111]; △ — вдоль [100]; □ — противоположно [111]; — — — область нестабильности для спинов, не направленных по [100]

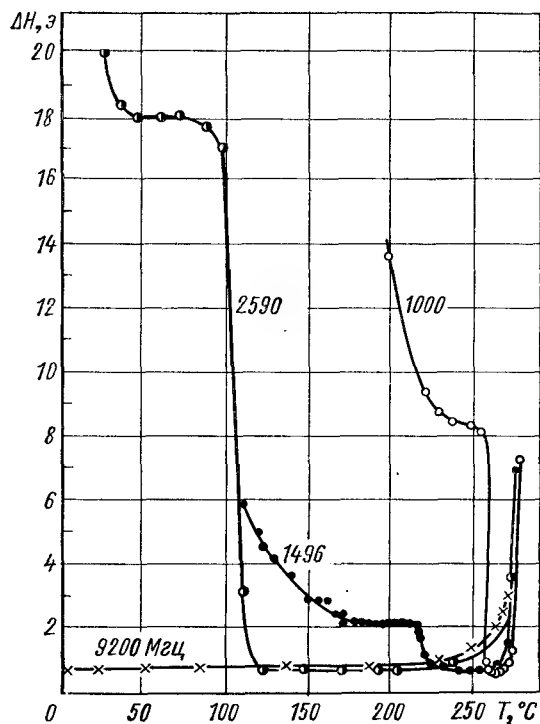


Рис. 29.37. Зависимость ширины линии ферромагнитного резонанса монокристалла иттриевого граната при различных частотах от температуры [154]

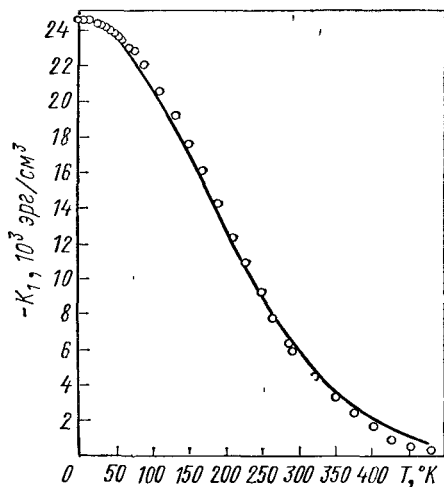


Рис. 29.38. Зависимость первой константы анизотропии K_1 иттриевого феррита-граната от температуры [123]:

○ — экспериментальные данные; — — расчет по модели кристаллического поля

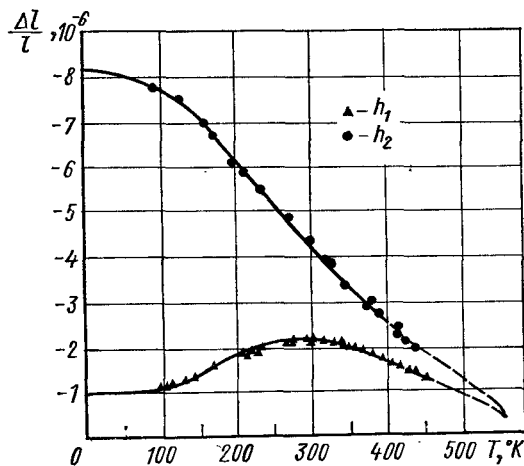


Рис. 29.39. Зависимость констант магнитострикции для иттриевого феррита-граната от температуры [148]

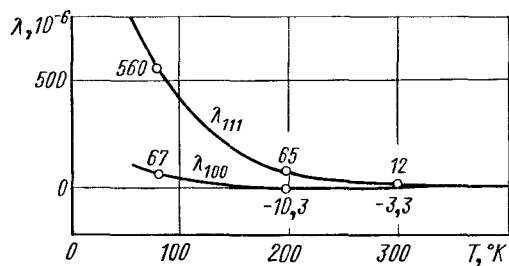
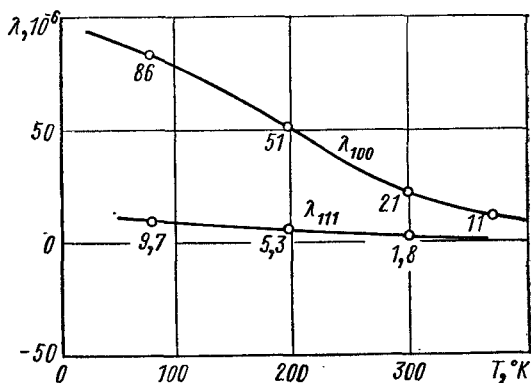


Рис. 29.41. Зависимость констант магнитострикции феррита-граната тербия $Tb_3Fe_5O_{12}$ от температуры [138]

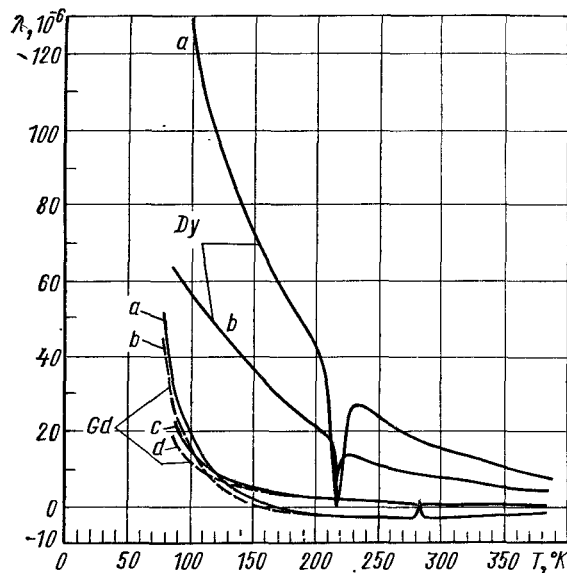


Рис. 29.42. Температурная зависимость магнитострикции ферритов-гранатов $Gd_3Fe_5O_{12}$ и $Dy_3Fe_5O_{12}$ [149]:

Dy: a — λ_{100} , $H = 7,6$ кэ; b — λ_{111} , $H = 8,1$ кэ; Gd: a — λ_{100} , $H = 9,2$ кэ; b — λ_{100} , $H = 5,2$ кэ; c — λ_{111} , $H = 9,2$ кэ; d — λ_{111} , $H = 7,6$ кэ

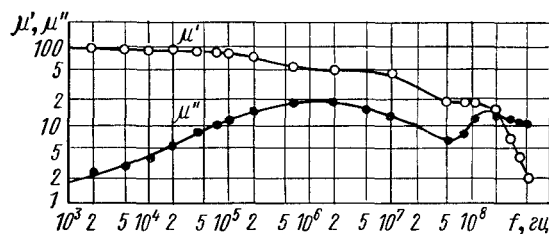


Рис. 29.43. Действительная μ' и мнимая μ'' части начальной магнитной проницаемости при 20° С образца $Y_3Fe_5O_{12}$ как функция частоты f ($\rho = 4,9$ г/см³) [150]

Рис. 29.40. Зависимость констант магнитострикции для феррита-граната европия $Eu_3Fe_5O_{12}$ от температуры [138]

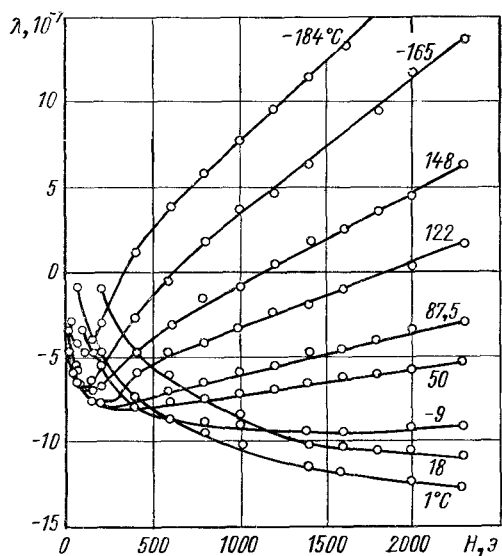


Рис. 29.44. Изотермы магнитострикции для феррита-граната $3\text{Gd}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{Fe}_2\text{O}_3$ [116]

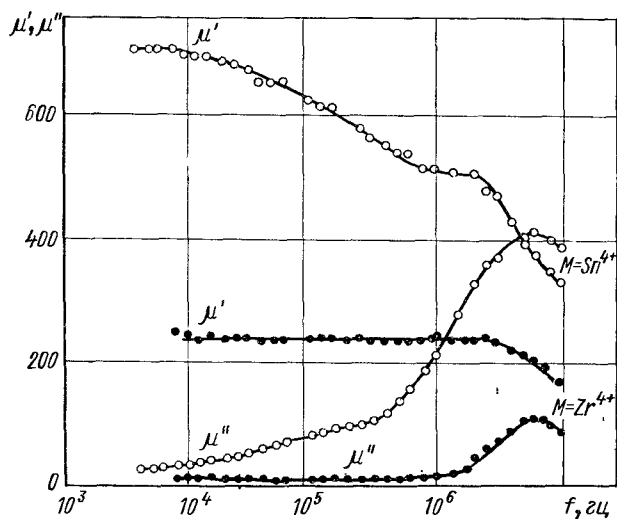


Рис. 29.45. Зависимости μ' и μ'' твердых растворов $\{\text{Y}_{2.2}\text{Ca}_{0.8}\}[(\text{Fe}_{1.2}\text{M}_{0.8})(\text{Fe}_3)\text{O}_{12}]$ от частоты при 20°C [151]

29.3. ГЕКСАГОНАЛЬНЫЕ ФЕРРИТЫ

Большая группа ферримагнитных окислов обладает гексагональной кристаллической структурой [153—156, 159]. На рис. 29.48 приведена диаграмма, на которой указаны химические составы таких веществ. В углах расположены соединения BaO , MeO и Fe_2O_3 . Символ Me означает двухвалентный ион первой переходной группы или ионы Zn^{2+} и Mg^{2+} , а также комбинацию этих ионов (например, Li^+ и Fe^{3+}). На линии диаграммы, соединяющей BaO и Fe_2O_3 , отмечена точка, соответствующая антиферромагнитному бариевому ферриту BaFe_2O_4 . Точка S на линии $\text{MeO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$ соответ-

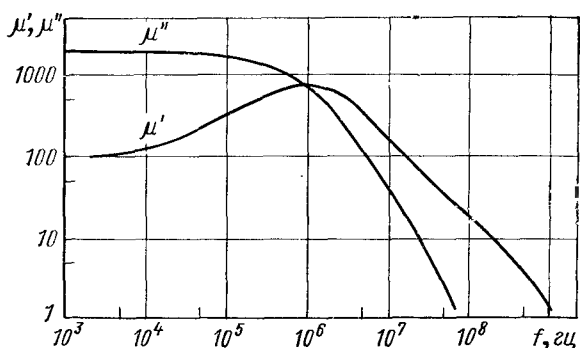


Рис. 29.46. Зависимость μ' и μ'' от частоты для граната $\text{Y}_3\text{Sc}_{0.9}\text{Fe}_{1.1}(\text{Fe}_3)\text{O}_{12}$ при 24°C [152]

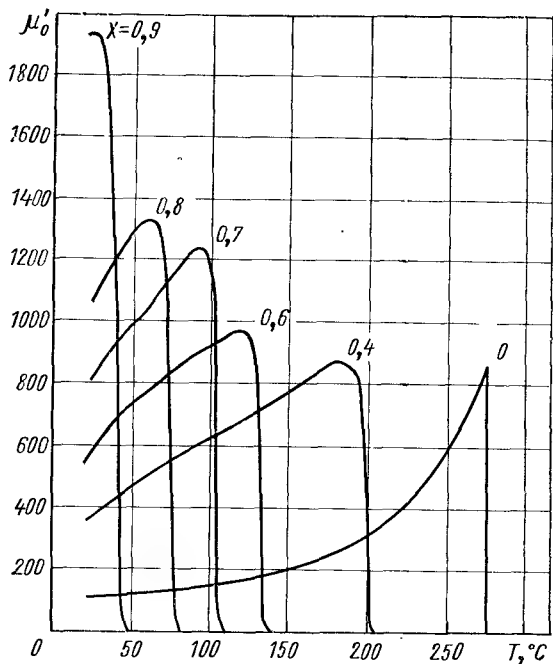


Рис. 29.47. Зависимость μ' от температуры для $\text{Y}_3[\text{Sc}_x\text{Fe}_{2-x}](\text{Fe}_3)\text{O}_{12}$ от 20°C до T_c [152]

ствует соединению $\text{Me}_2\text{Fe}_4\text{O}_8$ с кубической кристаллической структурой типа шпинели. Точка M отвечает окислу, имеющему гексагональную структуру и химический состав $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19} = \text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$. Точка Y на диаграмме соответствует соединению $\text{Ba}_2\text{Me}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22} = 2(\text{BaO} \cdot \text{MeO} \cdot 3\text{Fe}_2\text{O}_3)$.

Известно также большое число соединений с составами, лежащими на линиях $\text{M} - \text{S}$ и $\text{M} - \text{Y}$, а элементарная ячейка этих соединений может быть легко построена из ячеек структуры S , M и Y . В большинстве случаев ион Ba^{2+} ($r = 1,43 \text{ \AA}$) может быть частично или полностью замещен ионами Ca^{2+} ($r = 1,06 \text{ \AA}$), Sr^{2+} ($r = 1,27 \text{ \AA}$) или Pb^{2+} ($r = 1,32 \text{ \AA}$) или трехвалентными ионами, например La^{3+} ($r = 1,22 \text{ \AA}$).

Энергия кристаллографической магнитной анизотропии гексагональных кристаллов описывается формулой

$$E_a = K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta + K'_3 \sin^6 \theta + K_3 \sin^6 \theta \cos^6 (\varphi - \psi),$$

где E_a — энергия анизотропии; K_1 , K_2 , K'_3 и K_3 — константы анизотропии; θ и φ — полярные координаты. Для полей анизотропии:

$$\theta_0 = 0^\circ; \quad H_0^A = \frac{2K_1}{M_s};$$

$$\theta_0 = 90^\circ; \quad H_0^A = -\frac{2(K_1 + 2K_2)}{M_s};$$

$$\sin \theta_0 = \sqrt{\frac{K_1}{2K_2}}; \quad H_0^A = 2 \left(\frac{K_1}{K_2} \right) \frac{K_1 + 2K_2}{M_s}.$$

Здесь H_0^A — напряженность эффективного поля, необходимого для поворота вектора намагниченности в те направления, где меняется только θ , а H_φ^A — поле, вращающее вектор намагниченности на поверхности конуса. Значение H_φ^A определяется формулой:

$$H_\varphi^A = 36 |K_3| \frac{\sin^4 \theta_0}{M_s}.$$

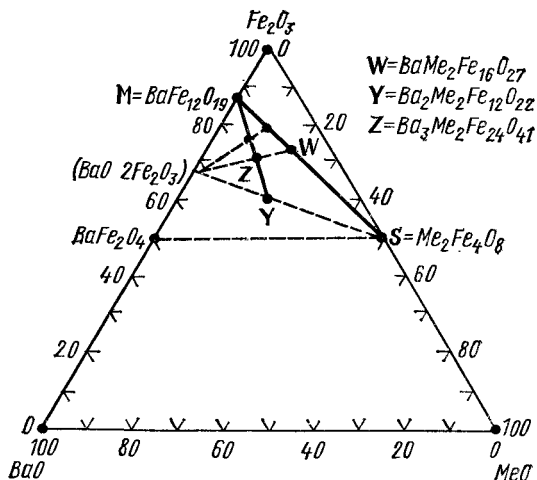


Рис. 29.48. Диаграмма составов ферримагнитных оксидов. Символ Me обозначает двухвалентный ион (или комбинацию двухвалентных ионов) [159]

Таблица 29.35

Некоторые характеристики ферромагнитных оксидов с гексагональной структурой

Химический состав	Символ	Число слоев в элементарной ячейке	Пространственная группа	Параметр c , Å	Рентгеновская плотность ρ_X , г/см ³	Молекулярная масса M , а. е. м	Литература
BaFe ₁₂ O ₁₉	M	(10)	$P6_3/mmc$	23,2	5,28	1112	[155]
Ba ₂ Fe ₄ O ₈	S	—	—	—	5,24	232	[159]
BaFe ₂ Fe ₁₆ O ₂₇	W	(14) ₁	$P6_3/mmc$	32,845	5,31	1575	[156]
Ba ₂ Fe ₂ Fe ₂₆ O ₄₆	X	(12) ₃	$R\bar{3}m$	84,11	5,29	2686	[156]
Ba ₂ Fe ₂ Fe ₁₂ O ₂₂	Y	(6) ₃	$R\bar{3}m$	43,588	5,39	1408	[156]
Ba ₃ Fe ₂ Fe ₂₄ O ₄₁	Z	(22) ₁	$P6_3/mmc$	52,3	5,33	2520	[156]
Ba ₃ Zn ₂ Fe ₄₀ O ₆₅	—	(17) ₂	$P6_3/mmc$	79,36	—	—	[157, 158]
Ba ₄ Zn ₂ Fe ₃₆ O ₆₀	M ₂ Y	(16) ₃	$R\bar{3}m$	38,1	5,31	3622	[157]
Ba ₄ Zn ₂ Fe ₅₂ O ₈₄	—	(22) ₃	$R\bar{3}m$	153,85	—	—	[157, 158]
Ba ₅ Zn ₂ Fe ₆₄ O ₁₀₃	—	(27) ₂	$P6_3/mmc$	125,76	—	—	[157, 158]
Ba ₈ Zn ₆ Fe ₆₀ O ₁₀₄	—	(28) ₃	$R\bar{3}m$	200,40	—	—	[157]
Ba ₁₀ Zn ₈ Fe ₇₂ O ₁₂₆	—	(34) ₃	$R\bar{3}m$	243,98	—	—	[157]
Ba ₁₂ Zn ₁₀ Fe ₈₄ O ₁₄₈	—	(40) ₁	$R\bar{3}m$	95,84	—	—	[157]
Ba ₁₄ Zn ₁₂ Fe ₉₆ O ₁₇₀	—	(46) ₃	$R\bar{3}m$	331,09	—	—	[157]

Таблица 29.36

Состав и структура гексагональных ферритов типа Me_2Y_n , где Me—Mn, Zn [166]

Состав	Последовательность блоков	Количество анионных слоев	Пространственная группа	Параметр c , Å	
				Эксперимент	Расчет
Ba ₂₀ (Mn, Zn) ₁₈ Fe ₁₃₅ O ₂₃₆	M(Y) ₄ M(Y) ₅	(64) ₃	$R\bar{3}m$	462,0	462,0
Ba ₂₂ (Mn, Zn) ₂₀ Fe ₁₄₄ O ₂₅₈	M(Y) ₅ M(Y) ₅	(70) ₁	$P6_3/mmc$	168,6	168,5
Ba ₂₄ (Mn, Zn) ₂₂ Fe ₁₅₆ O ₂₈₀	M ... M(Y) ₁₁	(76) ₃	$R\bar{3}m$	549,3	549,2
Ba ₂₄ (Mn, Zn) ₂₂ Fe ₁₅₆ O ₂₈₀	M(Y) ₁ M(Y) ₁₀	(76) ₁	$P\bar{3}m1$	183,1	183,1
Ba ₂₄ (Mn, Zn) ₂₂ Fe ₁₅₆ O ₂₈₀	M(Y) ₄ M(Y) ₇	(76) ₁	$P\bar{3}m1$	183,1	183,1
Ba ₂₄ (Mn, Zn) ₂₂ Fe ₁₅₆ O ₂₈₀	M(Y) ₅ M(Y) ₆	(76) ₃	$R\bar{3}m$	549,3	549,2
Ba ₂₈ (Mn, Zn) ₂₆ Fe ₁₈₀ O ₃₂₄	M(Y) ₆ M(Y) ₇	(88) ₃	$R\bar{3}m$	636,7	636,4

Таблица 29.37

Рентгеновская плотность ρ_X и молекулярная масса M некоторых окислов с гексагональной кристаллической структурой [5]

Металл	$W = BaMe_2Fe_{18}O_{27}$		$Y = Ba_2Me_2Fe_{12}O_{22}$		$Z = Ba_3Me_2Fe_{24}O_{41}$	
	$\rho_X, г/см^3$	$M, а.е. м.$	$\rho_X, г/см^3$	$M, а.е. м.$	$\rho_X, г/см^3$	$M, а.е. м.$
Mg	5,10	1512	5,14	1346	5,20	2457
Mn	5,31	1573	5,38	1406	5,33	2518
Fe	5,31	1575	5,39	1408	5,33	2520
Co	5,31	1577	5,40	1410	5,35	2522
Ni	5,32	1580	5,40	1414	5,35	2526
Cu	5,36	1590	5,45	1424	5,37	2536
Zn	5,37	1594	5,46	1428	5,37	2539

Таблица 29.40

Точка Кюри и намагниченность насыщения гексаферритов типа Me_2Z [5]

Металл	$T_C, ^\circ K$	$\sigma_s, гс \cdot см^3/г$		$4\pi M_s, гс$	$n_B \cdot \mu_B (T=0^\circ K)$	
		$0^\circ K$	$293^\circ K$	$0^\circ K$	Эксперимент	Расчет
Mg	—	55	—	—	24	26,9
Co	680	69	50	3350	31,2	29,8
Ni	—	54	—	—	24,6	26,1
Cu	710	60	46	3100	27,2	27,1
Zn	630	—	58	3900	—	—

Таблица 29.41

Магнитные свойства ферритов типа $SrO \cdot nFe_2O_3$ и $PbO \cdot nFe_2O_3$ [160—162]

Соединение	$4\pi M_s, гс$	$4\pi M_r, гс$	$H_c, э$
$SrFe_8O_{13}(SrO \cdot 4Fe_2O_3)$	3250	2250	3000
$SrFe_{12}O_{19}(SrO \cdot 6Fe_2O_3)$	3100	2300	2900
$SrFe_{18}O_{28}(SrO \cdot 9Fe_2O_3)$	1900	1500	3350
$PbFe_8O_{13}(PbO \cdot 4Fe_2O_3)$	3500	2000	1500
$PbFe_{12}O_{19}(PbO \cdot 6Fe_2O_3)$	2500	1800	2900
$PbFe_{18}O_{28}(PbO \cdot 9Fe_2O_3)$	1700	1000	2400

Таблица 29.42

Константа анизотропии K_3 и поле анизотропии H_φ^A для некоторых гексагональных ферромагнитных окислов [5]

Соединение	$t, ^\circ C$	$M_s, гс$	$K_3, эр/см^3$	$H_\varphi^A, э$
$Ba_2Co_2Fe_{12}O_{22}$	—196	210	2000	340
	20	187	800	155
	170	145	150	37
$Ba_3Co_{1,5}Fe_{0,5}^{2+}Fe_{24}O_{41}$	20	280	55	7
	158	220	~9	~2
$Ba_3Co_{1,99}Fe_{0,08}^{2+}Fe_{24}O_{41}$	20	280	120	16
$Ba_2CoZn_{0,5}Fe_{0,5}^{2+}Fe_{24}O_{41}$	20	290	25	3
$Ba_2Zn_{1,5}Fe_{0,5}^{2+}Fe_{12}O_{22}$	20	190	< 6	< 1

Таблица 29.38

Точка Кюри и намагниченность насыщения гексаферритов типа Me_2W [5]

Металлы	$T_C, ^\circ K$	$\sigma_s, гс \cdot см^3/г$		$4\pi M_s, гс$	$n_B \cdot \mu_B (T=0^\circ K)$	
		$0^\circ K$	$293^\circ K$	$0^\circ K$	Эксперимент	Расчет
Mn_2	690	97	59	3900	27,4	29,2
Fe_2^{2+}	730	98	78	5220	27,4	28
$NiFe^{2+}$	790	79	52	3450	22,3	26,4
$ZnFe^{2+}$	700	108	73	4800	30,7	31,6
$Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe^{2+}$	720	104	68	4550	29,5	29,2

Таблица 29.39

Точка Кюри и намагниченность насыщения гексаферритов типа Me_2Y [5]

Металл	$T_C, ^\circ K$	$\sigma_s, гс \cdot см^3/г$		$4\pi M_s, гс$	$n_B \cdot \mu_B (T=0^\circ K)$	
		$0^\circ K$	$293^\circ K$	$0^\circ K$	Эксперимент	Расчет
Mg	550	20	23	1500	6,9	2,2
Mn	560	42	31	2100	10,6	9,2
Co	610	39	34	2300	9,8	7,4
Ni	660	25	24	1600	6,3	4,6
Cu	—	28	—	—	7,1	2,6
Zn	400	72	42	2850	18,4	20

Константы анизотропии K_1 или K_1+2K_2 , намагниченность насыщения M_s и поле анизотропии H_0^A некоторых гексагональных окислов при температуре 20°C [5]

Соединение	Символ	$K_1, 10^6 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3}$	$K_1+2K_2, 10^6 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3}$	$M_s, \text{ эс}$	$H_0^A, \text{ э}$
BaFe ₁₂ O ₁₉ *	M	+3,3	—	380	17 000
BaFe ₁₈ O ₂₇ *	Fe ₂ W	+3,0	—	314	19 000
BaZnFe ₁₇ O ₂₇	FeZnW	+2,4	—	380	12 500
BaZn _{1,5} Fe _{16,5} O ₂₇	Fe _{0,5} Zn _{1,5} W	+2,1	—	380	11 100
BaMnZnFe ₁₆ O ₂₇	MnZnW	+1,9	—	370	10 200
BaNi ₂ Fe ₁₆ O ₂₇	Ni ₂ W	+2,1	—	330	12 700
BaNi _{0,5} ZnFe _{16,5} O ₂₇	ZnFe _{0,5} Ni _{0,5} W	+1,6	—	350	9 100
CaCo _{0,75} Zn _{0,75} Fe _{16,5} O ₂₇	Fe _{0,5} Co _{0,75} Zn _{0,75} W	—	—0,4	360	2 200
Ba ₂ Mg ₂ Fe ₁₂ O ₂₂	Mg ₂ Y	—	—0,6	119	10 000
Ba ₂ Ni ₂ Fe ₁₂ O ₂₂	Ni ₂ Y	—	—0,9	127	14 000
Ba ₂ Zn ₂ Fe ₁₂ O ₂₂	Zn ₂ Y	—	—1,0	227	9 000
Ba ₂ Zn _{1,5} Fe _{12,5} O ₂₂ *	Fe _{0,5} Zn _{1,5} Y	—	—0,9	191	9 500
Ba ₂ Co ₂ Fe ₁₂ O ₂₂ *	Co ₂ Y	—	—2,6	185	28 000
Ba ₃ Co ₂ Fe ₂₄ O ₄₁ *	Co ₂ Z	—	—1,8	270	13 000

* Измерения проводились на монокристаллах.

Таблица 29.44

Магнитные свойства монокристаллов феррооксдюра BaFe_{12-2x}Ir_x⁴⁺Zn_x²⁺O₁₉ с большой анизотропией в базисной плоскости [163]

Состав x	$H_a, \text{ э} (T = 300^\circ\text{K})$		$\Delta H, \text{ э} (T = 300^\circ\text{K})$	$T_C, ^\circ\text{K}$	$\sigma_s', \frac{\text{эс}\cdot\text{см}^3}{\text{г}} (T = 300^\circ\text{K})$
	из измерений намагниченности	из ферромагнитного резонанса			
0	17 000	17 000	53 при 55 Гц	720	75
0,16	9 600	—	—	635	—
0,52	15 000	16 000	1050 при 17 Гц	560	65
0,56	16 000	—	—	550	60
0,60	20 000	22 000	1175 при 14 Гц	520	47

Таблица 29.45

Ширина линии ферромагнитного резонанса для монокристаллов Me₂Y [164]

Монокристалл	Параметр c, Å	$\Delta H, \text{ э} (T = 300^\circ\text{K})$
BeZn ₂ Fe ₁₂ O ₂₂	43,577	8 (9000 МГц)
Ba(Zn, Мп)Fe ₁₂ O ₂₂ (3,5 % Мп по весу)	43,564	3,8 (9000 МГц) 4,9 (17 300 МГц)

Таблица 29.46

Свойства некоторых гексагональных ферритов, используемых в волноводах в миллиметровом диапазоне длин волн [165]

Состав	$T_{\text{обж}}, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ г/см}^3$	Степень ориентации	$\text{tg } \delta (f=9,5 \text{ ГГц})$	$\varepsilon'/\varepsilon_0 (f=9,5 \text{ ГГц})$	$4\pi M_s', \text{ эс}$	$H_a, \text{ э}$	$T_C, ^\circ\text{K}$	$f_{\text{рез}}, \text{ ГГц}$
Система BaO·2NiO·xAl ₂ O ₃ ·(8-x)Fe ₂ O ₃ , обозначаемая NiW(xAl)									
Ni ₂ W(0,40 Al)	1300	4,58	0,69	—	—	—	15 200	750	49,0
Ni ₂ W(0,60 Al)	1350	4,58	0,88	0,001	15,4	2680	17 100	730	52,0
Ni ₂ W(0,73 Al)	1350	4,60	0,83	0,003	14,9	2440	17 900	720	55,0
Ni ₂ W(0,86 Al)	1350	4,63	0,84	0,004	15,1	2270	19 000	710	58,0
Ni ₂ W(1,00 Al)	1350	4,55	0,86	0,002	14,5	2080	19 700	690	62,0
Система SrO·xAl ₂ O ₃ (6-x)Fe ₂ O ₃ , обозначаемая SrM(xAl)									
SrM(0,00 Al)	1350	4,91	0,79	—	—	4180	19 000	750	60,0
SrM(0,20 Al)	1300	4,48	0,87	0,001	18,6	3300	20 000	730	64,0
SrM(0,53 Al)	1300	4,11	0,89	0,001	16,2	2110	25 200	690	74,0
SrM(0,80 Al)	1300	4,00	0,91	—	—	—	31 000	650	86,0
SrM(0,95 Al)	1300	3,95	0,88	—	—	—	34 800	630	93,0

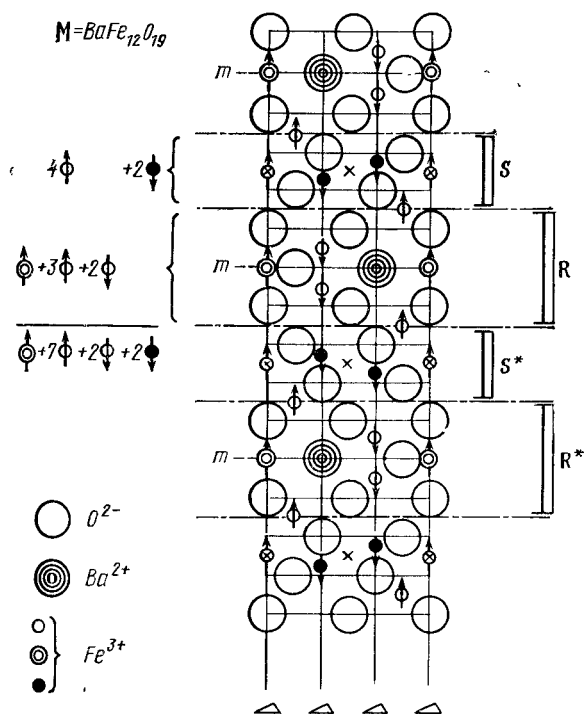


Рис. 29.49. Сечение структуры магнетоплюмбита М с осью c , направленной вертикально [5]. Стрелки — направление спинов; вертикальные линии — оси симметрии третьего порядка; крестики — положения центров симметрии; через слон, содержащие ионы бария, проходят зеркальные плоскости, обозначенные буквой m ; изображенная структура состоит из шпинельных блоков S , разделенных блоками, содержащими ионы бария; звездочки — поворот данного блока вокруг оси c на 180°

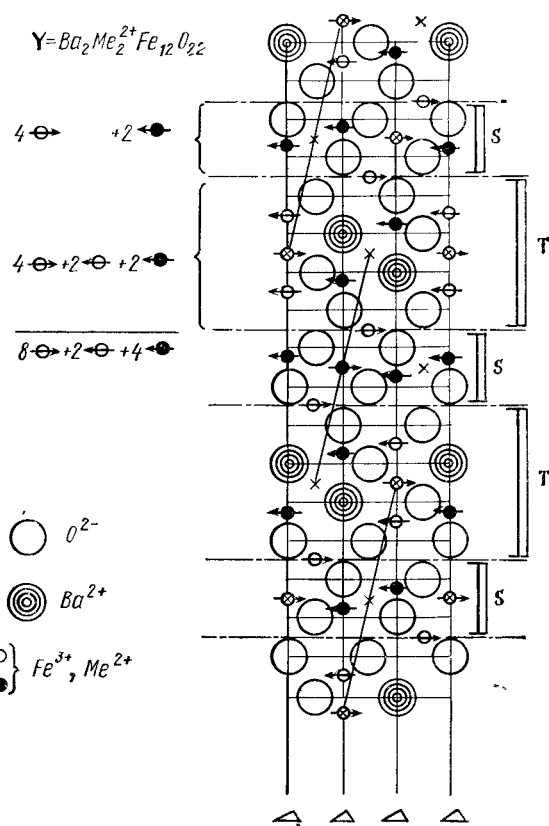


Рис. 29.50. Сечение структуры типа Y с осью c , направленной вертикально [5]. Стрелки — направления спинов, которые в данном случае ориентированы перпендикулярно осям c ; вертикальные линии — оси симметрии третьего порядка; крестики — положения центров симметрии; изображенная структура состоит из последовательно расположенных блоков S и T

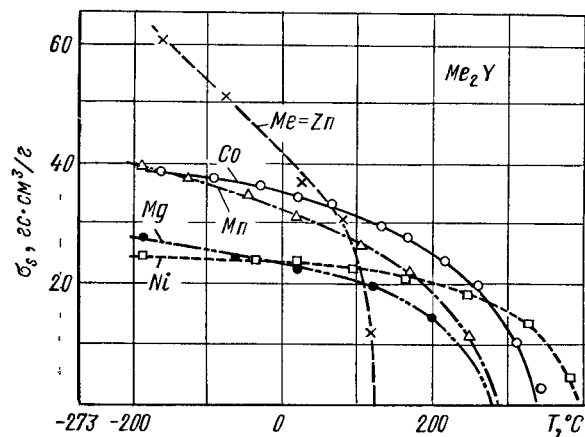


Рис. 29.51. Зависимость намагниченности насыщения σ_s соединений со структурой типа Y от температуры [5]. Измерение проводилось на поликристаллических образцах в поле напряженности 11 000 э

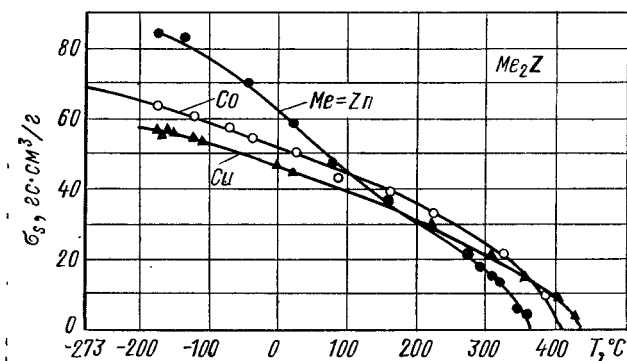


Рис. 29.52. Зависимость намагниченности насыщения σ_s соединений со структурой типа Z от температуры. Измерения проводились на поликристаллических образцах в поле напряженности 11 000 э для Co_2Z и Zn_2Z и в поле напряженности 18 000 э для Cu_2Z [5]

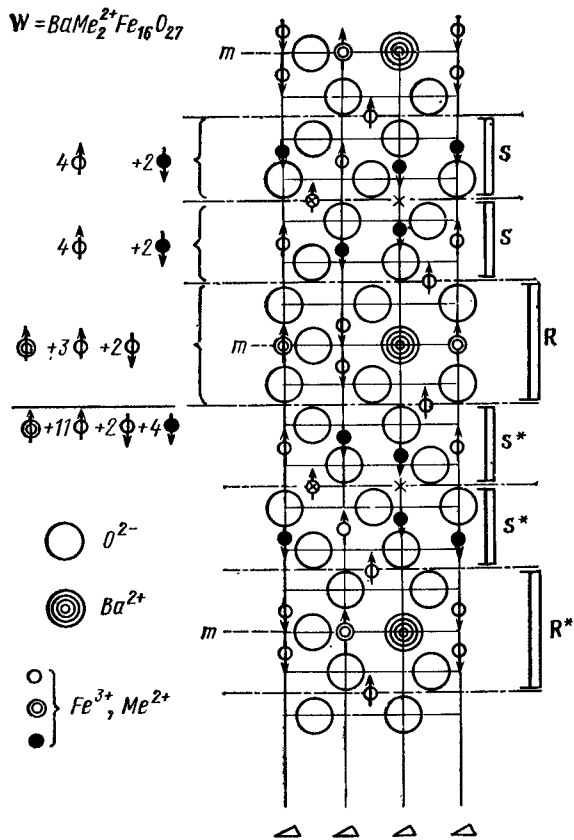


Рис. 29.53. Сечение структуры типа W с осью c , направленной вертикально [5]. Стрелки — направления спинов; вертикальные линии — оси симметрии третьего порядка; звездочки — поворот данного блока вокруг оси c на 180° ; структуру можно рассматривать как сумму структур типа M и S

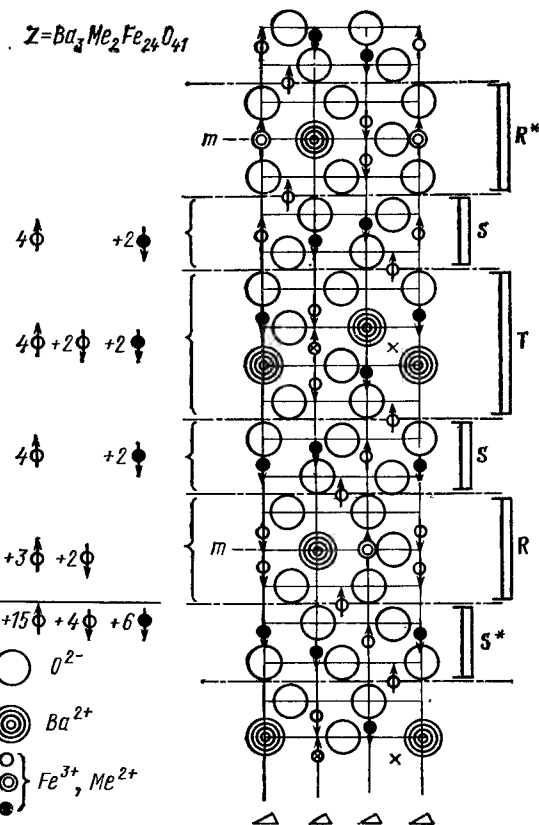


Рис. 29.54. Сечение структуры типа Z с осью c , направленной вертикально [5]. Стрелки — направления спинов; вертикальные линии — оси симметрии третьего порядка; крестики — положения центра симметрии; звездочки — поворот данного блока вокруг оси c на 180° ; структуру можно представить как сумму структур типа M и Y

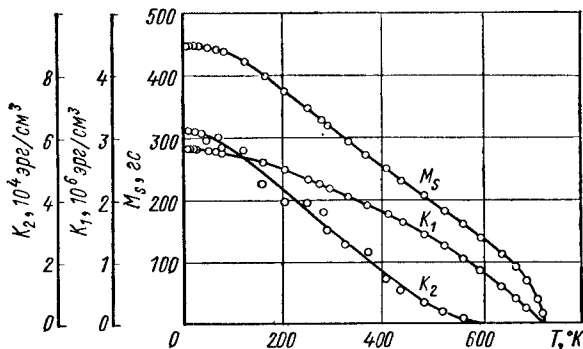


Рис. 29.55. Зависимость намагниченности насыщения M_s и констант анизотропии K_1 и K_2 для $PbO \cdot 6Fe_2O_3$ от температуры [5]

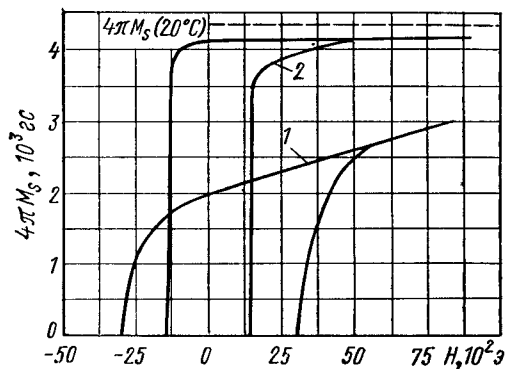


Рис. 29.56. Гистерезисные петли для образца $BaFe_{12}O_{19}$ [5]:

1 — изотропный образец; 2 — кристаллографически текстурированный образец

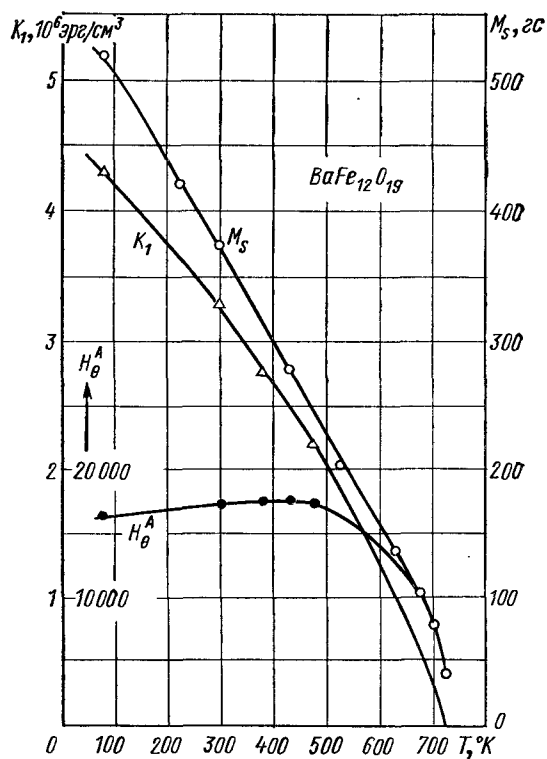


Рис. 29.57. Зависимость намагниченности насыщения M_s , константы анизотропии K_1 и поля анизотропии H_θ^A для $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ от температуры

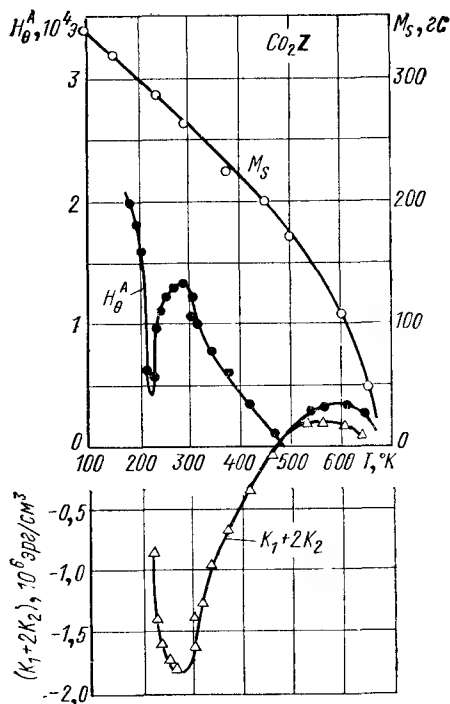


Рис. 29.59. Зависимость намагниченности насыщения M_s , констант анизотропии $K_1 + 2K_2$ и поля анизотропии для Co_2Z от температуры [5]

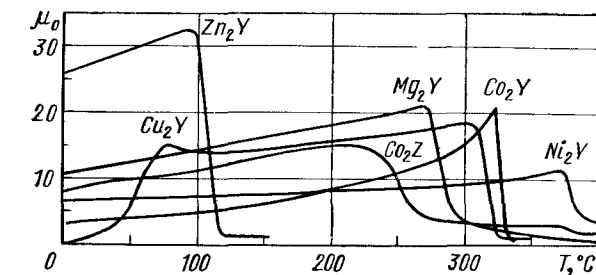
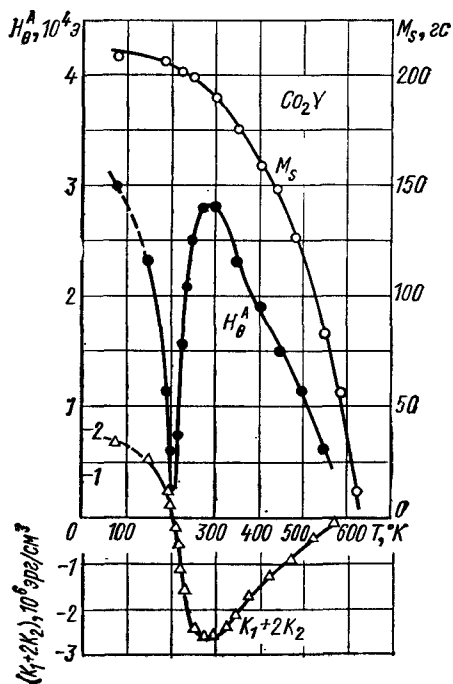


Рис. 29.60. Зависимость начальной магнитной проницаемости некоторых поликристаллических образцов гексагональных окислов от температуры [5]

рис. 29.58. Зависимость намагниченности насыщения M_s , констант анизотропии $K_1 + 2K_2$ и поля анизотропии H_θ^A для Co_2Y от температуры [5]

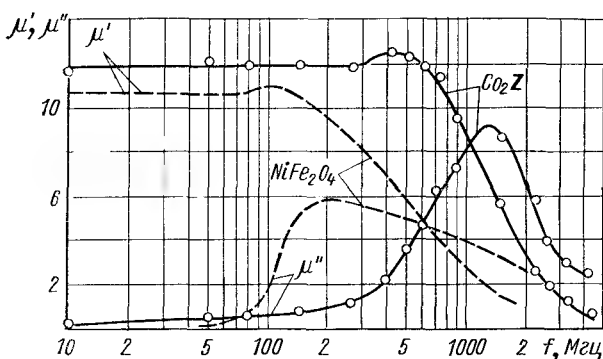


Рис. 29.61. Магнитные спектры поликристаллического образца Co_2Z и шпинели NiFe_2O_4 , которая имеет примерно то же значение магнитной проницаемости на низких частотах [5]

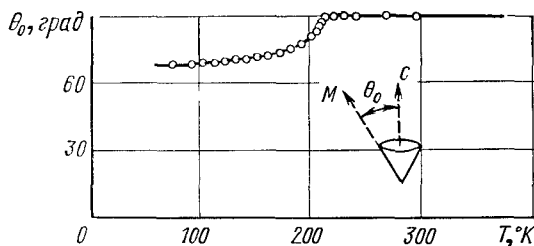


Рис. 29.63. Зависимость равновесного положения вектора намагниченности относительно оси c для Co_2Y от температуры [5]

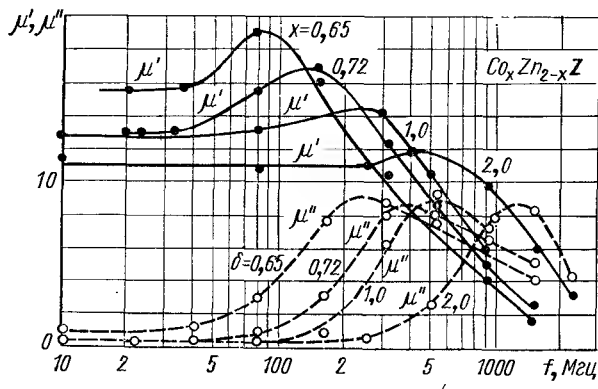


Рис. 29.62. Магнитные спектры некоторых ферритов группы $\text{Co}_x\text{Zn}_{2-x}\text{Z}$ [5]

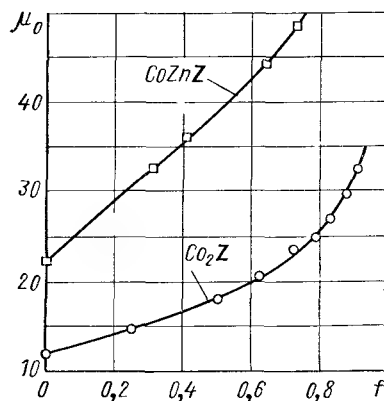


Рис. 29.64. Зависимость μ_0 образцов Co_2Z и CoZnZ от f — различной степени ориентации кристаллитов [5]

29.4. НЕКОТОРЫЕ ФЕРРО- И ФЕРРИМАГНИТНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Таблица 29.47

Магнитные свойства соединений трехвалентного хрома с галогенами [167]

Обозначения: θ_p — парамагнитная точка Кюри; c_m — постоянная закона Кюри — Вейса; $p_{эф}$ — эффективный магнитный момент

Соединение	Структура	T_C , °К	θ_p , °К	n_B , ν_B	$4\pi M_S$, эс	$\frac{2K}{M_S}$, э $T=1,5^\circ\text{К}$	K_1 , $\frac{\text{эрг}}{\text{см}^3}$ $T=1,5^\circ\text{К}$	$\frac{c_m}{\text{см}^{-3} \cdot \text{град}}$ моль	$p_{эф}$, ν_B
CrF_3	$D_{3d}^6 - R\bar{3}c$; $a=5,2643\text{Å}$; $\alpha=56,563^\circ$	69,8	-124	—	—	—	—	1,85	3,85
CrCl_3	$D_3^3 - P3_112$; $D_3^5 - P_212$; $a=6,00\text{ Å}$; $c=17,3\text{ Å}$	16,8	+31	—	—	—	—	1,7	3,69
CrBr_3	$C_{3i}^2 - R\bar{3}$; $a=6,26\text{ Å}$; $c=18,2\text{ Å}$	35,7	+47	3,0	3250	6850	$9,4 \cdot 10^5$	1,84	3,85
CrI_3	$D_3^3 - P3_112$	68	+70	3,1	2690	28 600	$3,1 \cdot 10^6$	2,07	4,03

Магнитные свойства CoMnO_3 , NiMnO_3 , BiMnO_3 и BiCrO_3 Обозначение: $\mu_{\text{эф}}$ — эффективный магнитный момент.

Соединение	Структура	Параметры ячейки $T=300^\circ\text{K}$	T_C , $^\circ\text{K}$	$n_B \cdot \mu_B$	$\mu_{\text{эф}}, \mu_B$	Литература
CoMnO_3	$C_{3i}^2 - \bar{R}\bar{3}$	$a = 5,385 \text{ \AA}$ $\alpha = 54^\circ 31'$	120	0,72 (0°K)	—	[170—172]
NiMnO_3	$C_{3i}^2 - \bar{R}\bar{3}$	$a = 5,343 \text{ \AA}$ $\alpha = 54^\circ 39'$	120—160	0,76 (0°K)	—	[170—172]
BiMnO_3	Перовскит	$a = c = 3,935 \text{ \AA}$ $b = 3,989 \text{ \AA}$ $\alpha = \gamma = 91^\circ 28'$ $\beta = 90^\circ 58'$	$\theta_p = 103$ 130	2 (77°K) 4 (экстраполяция)	5	[168, 169]
BiCrO_3	Перовскит	$a = c = 3,906 \text{ \AA}$ $b = 3,870 \text{ \AA}$ $\alpha = \gamma = 90^\circ 33'$ $\beta = 89^\circ 9'$	123	—	—	[168, 169]

Таблица 29.49

Кристаллографические и магнитные свойства ферримагнитных фторидов с ионами Fe^{3+} , Cr^{3+} и Co^{3+} [173]

Соединение	Структура		T_C , $^\circ\text{K}$	$n_B \cdot \mu_B$ (0°K)	$4\pi M_s$, эс (0°K)
	Высокотемпературная фаза	Низкотемпературная фаза			
$\text{Na}_5\text{Fe}_3\text{F}_{14}$	$a = 7,34 \text{ \AA};$ $c = 10,38 \text{ \AA}$ $\rho = 3,26 \text{ г/см}^3$	$a = 73,23 \text{ \AA};$ $b = 7,46 \text{ \AA}$ $c = 12,72 \text{ \AA};$ $\beta = 90 \pm 0,5^\circ$ $\rho = 3,15 \text{ г/см}^3$	80	5	2500
$\text{Na}_5\text{Cr}_3\text{F}_{14}$	—	—	< 20	—	—
$\text{Na}_5\text{Co}_3\text{F}_{14}$	—	—	$77 < T_C < 200$	—	—

Магнитные свойства соединений двухвалентного европия

Соединение	Структура	Параметры ячейки, Å	T_C , °K	θ_p , °K	C_M	n_B , μ_B ($T=0^\circ\text{K}$)	Литерату- ра
EuF_2	Кубическая	5,85	2	-5	7,79	—	[174]
EuCl_2	Орторомбическая	$a = 4,48$ $b = 7,48$ $c = 8,96$	—	0	6,90	—	[174]
EuBr_2	»	$a = 4,30$ $b = 9,20$ $c = 11,42$	—	0	—	—	[174]
EuI_2	Моноклинная	$a = 7,62$ $b = 8,23$ $c = 7,88$ $\beta = 98^\circ$	5	+5	7,83	7	[174]
EuO EuS EuSe EuTe	NaCl	5,143 5,96 6,19 6,60	73 16,5 7 7,8	+76 +19 +9 -6	7,60 7,80 7,33 7,04	6,80 6,87 6,70 —	[174]
$\text{Eu}_2\text{P}_2\text{O}_7$	Тетраэдрическая	—	—	-3	—	—	[86]
$\text{Eu}_3(\text{PO}_4)_2$	Ромбоэдрическая	—	—	+5	—	6,7	[86]
EuSiO_3	—	—	—	0	7,60	—	[174]
Eu_2SiO_4	Орторомбическая (порошок)	$a = 9,71$ $b = 49,56$ $c = 5,95$	7	+7	6,63	6,0	[174]
Eu_2SiO_4	Орторомбическая (монокристалл)	$a = 9,71$ $b = 49,56$ $c = 5,65$	—	+10	—	6,5	[174]
Eu_3SiO_6	Тетраэдрическая	—	4	+19	7,01	6,71	[174]
EuAl_2O_4 $\text{Eu}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ $\text{Eu}_5\text{Al}_2\text{O}_8$	Псевдокубическая	— — —	— — —	0 10 6	— — —	— 6,2 5,8	[86]

Таблица 29.51

Параметры элементарной ячейки гексагональной и кубической фаз некоторых фторидов типа ABF_3

Соединение	Синтез при атмосферном давлении	Синтез при высоком давлении
$RbNiF_3$ [87]	$a=5,847 \pm 0,001 \text{ \AA}$ $c=14,319 \pm 0,003 \text{ \AA}$ $c/a=2,449 \pm 0,001$ $v=424,0 \pm 0,2 \text{ \AA}^3$	$a=b=c=4,0769 \pm 0,0004 \text{ \AA}$ $v=67,76 \pm 0,02 \text{ \AA}^3$
$TiNiF_3$ [87]	$a=5,878 \pm 0,001 \text{ \AA}$ $c=14,364 \pm 0,005 \text{ \AA}$ $c/a=2,444 \pm 0,001$ $v=429,8 \pm 0,4 \text{ \AA}^3$	$a=b=c=4,0998 \pm 0,0002 \text{ \AA}$ $v=68,91 \pm 0,01 \text{ \AA}^3$
$CsMnF_3$ [87]	$a=6,230 \pm 0,002 \text{ \AA}$ $c=15,130 \pm 0,008 \text{ \AA}$ $c/a=2,429 \pm 0,002$ $v=508,6 \pm 0,6 \text{ \AA}^3$	$a=b=c=4,3308 \pm 0,0002 \text{ \AA}$ $v=81,23 \pm 0,01 \text{ \AA}^3$
$CsNiF_3$ [88]	Фаза 2L $a=6,236 \text{ \AA}$ $v=88,0 \text{ \AA}^3$	1) Фаза 9L $a=6,12 \text{ \AA}; c=22,15 \text{ \AA}$ $v=79,8 \text{ \AA}^3$ 2) Фаза 6L $a=6,05 \text{ \AA}; c=14,54 \text{ \AA}$ $v=76,8 \text{ \AA}^3$

Таблица 29.52

Магнитные свойства ферримангнитных фторидов

Соединение	$T_C, ^\circ K$	$\sigma_s, \frac{гс \cdot см^3}{г}$	$\frac{dT_C}{dp}, \frac{град}{кбар}$	Литература
$RbNiF_3$	139	21	+0,60	[89, 92, 95]
$CsNiF_3$	111	12	+0,53	[88]
$TiNiF_3$	150	11,6 (оценка)	—	[147]

Таблица 29.53

Магнитные свойства ферримангнетика $Ga_{2-x}Fe_xO_3$ [166]

Химический состав		$\mu_B, \frac{10^4}{г \cdot см^3}$ ($T=4,2^\circ K$; $H=6537 \text{ э}$)	$T, ^\circ K$
исходного расплава	по анализу		
$Ga_{1,3}Fe_{0,7}O_3$	$Ga_{1,18}Fe_{0,82}O_3$	0,395	129
$Ga_{1,2}Fe_{0,8}O_3$	$Ga_{1,14}Fe_{0,86}O_3$	0,540	166
$Ga_{1,1}Fe_{0,9}O_3$	$Ga_{1,07}Fe_{0,93}O_3$	0,630	196
$Ga_{1,0}Fe_{1,0}O_3$	$Ga_{0,98}Fe_{1,02}O_3$	0,789	243
$Ga_{0,92}Fe_{1,08}O_3$	$Ga_{0,89}Fe_{1,11}O_3$	0,935	295
$Ga_{0,8}Al_{0,2}Fe_{1,0}O_3$	$Ga_{0,81}Al_{0,11}Fe_{1,08}O_3$	0,793	267

29.5. МАРКИ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НЕКОТОРЫХ ФЕРРИТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СССР

Таблица 29.54

Магнитомягкие ферриты [80]

Обозначения: μ_0 — начальная магнитная проницаемость; $\mu_{\max}$ — максимальная магнитная проницаемость; $H_{\mu_{\max}}$ — напряженность магнитного поля, соответствующая $\mu_{\max}$; α_μ — относительный температурный коэффициент μ_0 ;

$f_{гр}$ — граничная частота; $\delta h/\mu_0^2$ — относительный коэффициент потерь на гистерезис

Марка феррита	Состав и структура	$T_C, ^\circ C$	μ_0	$\mu_{\max}$	$H_{\mu_{\max}}, \text{ э}$	$\alpha_\mu \cdot 10^6, \frac{1}{^\circ C}$	$f_{гр}, \text{ МГц, при которой}$		$\frac{\delta h}{\mu_0^2} \cdot 10^6$	$\rho, \frac{г}{см^3}$	$\rho, \text{ ом} \cdot см$
							$tg\delta=$ —0,1	$tg\delta=$ —0,02			
6000 НМ	Мп-Зп-шпинель	110	6000	10000	0,15	0,2—1,5	0,005	—	0,04	5,0	10
4000 НМ	Мп-Зп-шпинель	140	4000	7000	0,20	0,5—1,5	0,08	—	0,07	4,9	50

Марка феррита	Состав и структура	$T_C, ^\circ\text{C}$	ρ_0	$\mu_{\text{макс}}$	$H_{\mu, \text{макс}}, \text{э}$	$\alpha_\mu \cdot 10^{10}, \frac{1}{^\circ\text{C}}$	$f_{\text{ГР}}, \text{МГц},$ при которой		$\frac{\delta h}{2} \cdot 10^6$ μO	$\rho, \frac{\text{э}}{\text{см}^3}$	$\rho_0, \text{Ом}\cdot\text{см}$
							$\text{tg}\delta =$ $\delta = 0,1$	$\text{tg}\delta =$ $\delta = 0,02$			
2000 НМ	Мп-Зп-шпинель	200	2000	3500	0,25	$-2 \div +4,5$	0,35	0,06	0,17	4,6	50
2000НМ1	Мп-Зп-шпинель	200	2000	3500	0,40	$-0,1 \div +1,0$	0,4	0,05	0,17	4,6	$5 \cdot 10^2$
1500 НМ3	Мп-Зп-шпинель	200	1500	3000	0,60	$0 \div 0,7$	1,0	0,35	0,08	4,5	$2 \cdot 10^3$
1000 НМ3	Мп-Зп-шпинель	200	1000	2000	1,0	$0 \div 1,0$	2,0	0,7	0,11	4,4	$1 \cdot 10^3$
700 НМ	Мп-Зп-шпинель	240	700	2000	1,50	$-0,2 \div +1,2$	4,0	2,1	0,04	4,4	$2 \cdot 10^3$
2000 НН	Ni-Зп-шпинель	2000	70	7000	0,15	$3 \div 9$	0,2	0,005	1,10	5,0	$1 \cdot 10^3$
1000 НН	Ni-Зп-шпинель	1000	110	3000	0,40	$5 \div 15$	0,4	0,02	1,30	5,0	$2 \cdot 10^3$
200 НН	Ni-Зп-шпинель	200	120	300	2,00	$4 \div 10$	3,0	1,0	2,00	4,8	$1 \cdot 10^5$
150 ВЧ	Ni-Зп-шпинель	150	400	350	8,00	± 4	25	15	0,30	4,8	$1 \cdot 10^6$
100 ВЧ	Ni-Зп-шпинель	100	400	280	9,00	9	35	25	0,18	4,8	$1 \cdot 10^6$
50 ВЧ2	Ni-Зп-шпинель	50	450	170	10,00	$-1,0 \div +9,0$	70	35	1,30	4,7	$1 \cdot 10^6$
30 ВЧ2	Ni-Зп-шпинель	30	450	120	15,00	± 35	200	100	0,30	4,8	$1 \cdot 10^7$

* В интервале температур от $+20$ до $+70^\circ\text{C}$.

Таблица 29.55

Ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса [80]

Обозначения: T_C — точка Кюри; H_c — коэрцитивная сила; B_r — остаточная индукция; $K_{\text{пр}}$ — коэффициент прямоугольности; TKH_c — температурный коэффициент коэрцитивной силы; H_0 — напряженность порогового поля; SW — константа переключения; ρ_0 — удельное электропротивление

Марка феррита	Состав и структура	$T_C, ^\circ\text{C}$	$H_c, \text{э}$	$B_r, \text{эс}$	$K_{\text{пр}}$	$TKH_c, \%$ в интервале температур		$H_0, \text{э}$	$SW, \text{э}\cdot\text{мксек}$	$\rho_0, \text{Ом}\cdot\text{см}$
						от -60 до $+20^\circ\text{C}$	от $+20$ до $+70^\circ\text{C}$			
0,12 ВТ	Mg-Мп-шпинель	115	0,12	2000	0,91	2,0	1,3	0,70	0,35	$6 \cdot 10^4$
0,16 ВТ	Mg-Мп-шпинель	135	0,16	2000	0,93	1,8	1,2	0,70	0,50	$5 \cdot 10^4$
0,27 ВТ	Mg-Мп-шпинель	110	0,27	2000	0,90	1,7	1,3	0,50	0,45	$2 \cdot 10^5$
0,3 ВТ	Mg-Мп-шпинель	150	0,30	2100	0,93	1,3	0,8	1,20	0,60	—
0,37 ВТ	Mg-Мп-шпинель	145	0,37	1400	0,93	1,3	1,0	1,20	0,60	$1 \cdot 10^8$
0,44 ВТ	Mg-Мп-шпинель	180	0,44	1600	0,93	1,1	0,8	1,80	0,55	$2 \cdot 10^4$
0,7 ВТ	Mg-Мп-шпинель	240	0,70	2300	0,93	0,8	0,7	2,00	0,55	$2 \cdot 10^4$
0,9 ВТ	Mg-Мп-шпинель	235	0,90	2500	0,92	0,8	0,6	1,70	0,60	$2 \cdot 10^4$
1,3 ВТ	Mg-Мп-шпинель	250	1,30	2300	0,91	0,8	0,6	2,00	0,65	$25 \cdot 10^4$
1,5 ВТ	Mg-Мп-шпинель	250	1,50	2200	0,91	0,7	0,5	2,20	0,65	$5 \cdot 10^4$
2 ВТ	Mg-Мп-шпинель	260	2,00	1800	0,90	0,7	0,6	2,60	0,55	$5 \cdot 10^6$

Ферриты СВЧ-диапазона [80]

Обозначения: T_C — точка Кюри; M_s — намагниченность насыщения; B_s — индукция насыщения; B_r — остаточная индукция; ϵ' — вещественная часть диэлектрической проницаемости; μ' — вещественная часть магнитной проницаемости; ΔH — ширина линии ферромагнитного резонанса; $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла потерь; ρ — плотность; ρ_0 — удельное сопротивление

Марка феррита	Состав и структура	$T_C, ^\circ\text{C}$	$4\pi M_s, \text{ эс}$	$B_s, \text{ эс}$	$B_r, \text{ эс}$	ϵ'	μ'	$\Delta H, \text{ э на частоте}$		$\operatorname{tg} \delta$	$\rho, \frac{\text{э}}{\text{см}^3}$	$\rho_0, \text{ ом} \cdot \text{см}$
								9200 МГц	3000 МГц			
2СЧ 1	Mg-Mn-шпинель	370	1880	1520	1040	10,6	24	800	785	$6,4 \cdot 10^{-3}$	3,8	$5,0 \cdot 10^8$
2СЧ 4	Ni-Zn-шпинель	450	4180	3900	1400	12,5	47	120	—	$1,7 \cdot 10^{-2}$	4,9	$5,3 \cdot 10^8$
5СЧ	Ni-Zn-шпинель	340	2620	2660	640	11,9	94	180	—	$5,4 \cdot 10^{-3}$	4,8	$3,0 \cdot 10^8$
8СЧ 1	Mg-Al-шпинель	290	710	690	480	9,8	12	600	400	$1,6 \cdot 10^{-3}$	3,6	$1,5 \cdot 10^7$
10СЧ 6	Y-Fe-гранат	280	1700	1680	950	13,8	9,7	70	40	$1,6 \cdot 10^{-3}$	4,9	$1,2 \cdot 10^{12}$
10СЧ 8	Mg-Cr-шпинель	140	620	560	350	9,5	17	250	220	$2,8 \cdot 10^{-3}$	3,5	$5,8 \cdot 10^7$
10СЧ 12	Ni-Cr-шпинель	350	1100	890	590	9,0	8	540	400	$8,5 \cdot 10^{-3}$	4,8	$5,2 \cdot 10^6$
30СЧ 3	Y-Al-гранат	230	1180	1200	650	13,3	86	80	65	$3,4 \cdot 10^{-3}$	5,0	$3,8 \cdot 10^{11}$
40СЧ 2	Y-Al-гранат	180	750	750	340	14,1	44	80	55	$8,1 \cdot 10^{-4}$	4,8	$5,1 \cdot 10^{11}$
60СЧ	Y-Al-гранат	150	480	500	320	13,2	28	50	40	$4,2 \cdot 10^{-4}$	4,7	$9,0 \cdot 10^{11}$
80СЧ	Y-Al-гранат	120	310	360	90	12,5	23	70	55	$1,4 \cdot 10^{-3}$	4,9	$1,6 \cdot 10^{11}$

Таблица 29.57

Магнитотвердые ферриты [80]

Обозначения: T_C — точка Кюри; B_r — остаточная индукция; $B H_c$ — коэрцитивная сила по индукции; $M H_c$ — коэрцитивная сила по намагниченности; $(BH)_{\text{макс}}$ — удельная максимальная магнитная энергия; μ_r — обратимая магнитная проницаемость; α_B — температурный коэффициент остаточной индукции; ρ_0 — удельное электросопротивление

ρ — плотность									
Феррит	$T_C, ^\circ\text{C}$	$B_r, \text{ эс}$	$B H_c, \text{ э}$	$M H_c, \text{ э}$	$(BH)_{\text{макс}}, 10^6 \text{ эс} \cdot \text{э}$	μ_r	$\alpha_B^*, \%$ на 1°C	$\rho_0, \text{ ом} \cdot \text{см}$	$\rho, \text{ г/см}^3$
Гексаферрит Ва марки									
0,7 БИ	450	1800—2100	1400—1600	1500—3500	0,7—0,8	1,05—1,25	—0,2	10^8	4,5—5,0
1 БИ	450	1900—2200	1600—1800	2200—4000	0,8—1,1	1,05—1,25	—0,2	10^8	4,5—5,0
2БА1	450	2800—3300	2450—3000	> 3800	1,8—2,5	1,05—1,25	—0,2	10^8	4,5—5,0
2БА	450	3000—3500	2300—2900	2500—3800	2,0—2,9	1,05—1,25	—0,2	10^8	4,5—5,0
3БА	450	3500—4000	1600—2300	1600—2300	2,9—3,5	1,05—1,25	—0,2	10^8	4,5—5,0
Феррит Со марки 1ФК	550	2400—2700	1600—1900	> 1800	1,4—1,7	—	—0,052* —0,083*	10^4	3,3—3,5

* В интервале температур от -70 до $+200^\circ\text{C}$.

** В интервале температур от -70 до $+20^\circ\text{C}$.

*** В интервале температур от $+20$ до $+80^\circ\text{C}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Neel L. "Ann. phys.", 1948, v. 3, p. 137. (См. пер. в сб.: Антиферромагнетизм. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1956, с. 56).
2. Воесовский С. В., Шур Я. С. Ферромагнетизм. М., Гостехиздат, 1948.
3. Гуревич А. Г. Ферриты на сверхвысоких частотах. М., Физматгиз, 1960.
4. Wangness R. K. "Phys. Rev.", 1954, v. 93, p. 68.
5. Смит Я., Вейн Х. Ферриты. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
6. Shull C. G., Wollen E. O., Kohler W. C. "Phys. Rev.", 1951, v. 84, p. 912.
7. Bickford L. R., Brownlow J. M., Penoyer R. F. Proc. Instn Electr. Engrs», 1957, v. 104B, Suppl. 5, p. 238.
8. Bickford L. R., Pappis J., Stull J. L. "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 1210.
9. Bickford L. R. "Phys. Rev.", 1950, v. 78, p. 449.
10. Calhoun B. A. "Phys. Rev.", 1954, v. 94, p. 1582.

11. Nathans R. e. a. "Proc. Instn Electr. Engrs", 1957, v. 104B, Suppl. 5, p. 217.
12. Verwey J. W., Heilmann E. L. "J. Chem. Phys.", 1947, v. 15, p. 174.
13. Gorter E. W. "Philips. Res. Repts.", 1954, v. 9, p. 295.
14. Galt J. K., Matthias B. T., Remeika J. P. "Phys. Rev.", 1950, v. 79, p. 391.
15. Bozorth R. M., Tilden E. F., Williams A. J. "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 1788.
16. Dwight K., Menyuk N. "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1958, v. 3, Ser. 2, p. 41.
17. Smit J., Wijn H. P. J. "Adv. in Electr. and Electr. Phys.", 1954, v. 6, p. 83.
18. Yager W. A., Galt J. K., Merritt F. R. "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 1203.
19. Генделев С. Ш., Лаповок Б. Л., Рубинштейн Б. Е. «Физика твердого тела», 1963, т. 5, с. 3037.
20. Sekizawa H., Sekizawa K. "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 17, Suppl. B-1, p. 380.
21. Epstein D. J. Conf. on Magn. and Magn. Mater., Boston, Amer. Inst. Electr. Eng., 1957, p. 498.
22. Van Uitert L. G. "J. Chem. Phys.", 1956, v. 24, p. 306.
23. Hastings J. M., Corliss L. M. "Phys. Rev.", 1956, v. 104, p. 328.
24. Dillon J. F., Geschwind S., Jaccarino V. "Phys. Rev.", 1955, v. 100, p. 750.
25. Гуревич А. Г., Гублер И. Е., Титова А. Г. «Физика твердого тела», 1961, т. 8, с. 19.
26. Teale R. W. "J. Appl. Phys.", 1962, v. 33, Suppl. 3, p. 1295.
27. Завета К., Свирина Е., Маликова О. «Физика твердого тела», 1962, т. 4, с. 3593.
28. Braun P. B. "Nature", 1952, v. 170, p. 1123.
29. Folen V. J. "J. Appl. Phys.", 1960, Suppl., v. 31, p. 166.
30. Schnitzler A. D., Folen V. J., Rado G. T. "J. Appl. Phys.", 1960, Suppl., v. 31, p. 348.
31. Enz U. Erzeugung von Vetterschaft mit Ferriten, Thesis, Zürich, 1955.
32. Comstock R. L., Remeika J. P. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 1018.
33. Nielsen J. W. e. a. "J. Appl. Phys.", 1962, v. 33, Suppl., No. 3, p. 1379.
34. Bertaut F. "Compt. rend.", 1950, v. 230, p. 213.
35. Prince E., Trueting R. G. "Acta crystallogr.", 1956, v. 9, p. 1025.
36. Weil L., Bertaut F., Bochirol L. "J. phys. rad.", 1950, v. 11, p. 208.
37. Gorter E. W. "Nature", 1950, v. 165, p. 798.
38. Okamura T., Kojima Y. "Phys. Rev.", 1952, v. 86, p. 1040.
39. Weisz R. S. "Phys. Rev.", 1954, v. 96, p. 800.
40. Snoek J. L. "Philips. Techn. Rev.", 1946, v. 8, p. 353.
41. Okamura T., Torizuka Y. "Nature", 1951, v. 168, p. 872.
42. Okamura T., Fujimura T., Date M. "Phys. Rev.", 1952, v. 85, p. 1041.
43. Рабкин Л. И. Высокочастотные ферромагнетики. М.—Л., Физматгиз, 1960.
44. Bochirol L. "Compt. rend.", 1951, v. 233, p. 736.
45. Prince E. "Phys. Rev.", 1956, v. 102, p. 674.
46. Pauthenet R. "Compt. rend." 1950, v. 230, p. 1842.
47. Guillaud C. "Rev. Mod. Phys.", 1953, v. 25, p. 64.
48. Tannenwald P. E. "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 463.
49. Torizuka Y. "Sci., Repts. Res. Inst. Tôhoku Univ.", 1951, v. A 3, p. 383.
50. Corliss L. M., Hastings J. M., Brockman F. G. "Phys. Rev.", 1953, v. 90, p. 1013.
51. Bacon G. N., Roberts F. F. "Acta crystallogr.", 1953, v. 6, p. 57.
52. Jones G. O., Roberts F. F. "Proc. Phys. Soc. (London)", 1952, v. 65 B, p. 390.
53. Belson H. S., Kriessman C. J. "J. Appl. Phys.", 1959, v. 30, p. 176S.
54. Rado G. T., Folen V. J., Emerson W. H. "Proc. Instn Electr. Engrs", 1957, v. 104B, Suppl. 5, p. 198.
55. Yager W. A., Merritt F. R., Guillaud "Phys. Rev.", 1951, v. 81, p. 477.
56. Торопов Н. А., Борисенко А. И. «Журн. прикл. химии», 1950, т. 88, с. 1243.
57. Inoue T., Iida S. "J. Phys. Japan", 1958, v. 13, p. 656.
58. Guillaud C., Creveaux H. "Compt. rend.", 1950, v. 230, p. 1458.
59. Guillaud C. "J. phys. et radium", 1951, v. 12, p. 239.
60. Okamura T., Kojima Y., Torizuka Y. "Sci. Repts. Inst. Tôhoku Univ.", 1952, v. A4, p. 72.
61. Okamura T. "Phys. Rev.", 1952, v. 85, p. 690.
62. Gorter E. W. "Philips. Res. Repts.", 1954, v. 9, p. 295.
63. McGuire T. R. "Phys. Rev.", 1953, v. 91, p. 206.
64. Pippin J. E., Hogan C. L. Sci. Rep. NI Gordon McKay Lab. of Appl. Science, Haward Univ., N. Y., 1959.
65. Carter A. E., Miles D. A., Welch A. J. A. "Proc. Instn Electr Engrs", 1957, v. 104 B, Suppl. 5, p. 141.
66. Gorter E. W. "Philips. Res. Repts.", 1954, v. 9, p. 403.
67. van der Heide H., Bruijning H. G., Wijn HPJ. "Phil. Tech. Rev.", 1957, v. 18, p. 336.
68. Gorter E. W. "Philips. Res. Rept.", 1954, v. 9, p. 403.
69. Соловьев В. И. «Физика твердого тела», 1964, т. 6, с. 2524.
70. Tannenwald P. E. "Phys. Rev.", 1955, v. 100, p. 1713.
71. Healy D. M., Johnson R. A. "Phys. Rev.", 1956, v. 104, p. 635.
72. van Wieringen J. S. "Cahiers phys.", 1955, v. 62, p. 45.
73. Смоленский Г. А. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1952, т. 16, с. 728.
74. Enz U. "Physica", 1958, v. 24, p. 609.
75. Полтинников С. А., Давыдов Л. Д. «Физика твердого тела», 1964, т. 6, с. 2190.
76. Galt J. K. "Bull. Syst. Techn. J.", 1954, v. 33, p. 1023.
77. Koops C. G. "Phys. Rev.", 1951, v. 83, p. 121.
78. Funatogawa Z., Miyata H., Usami S. "J. Phys. Soc. Japan", 1959, v. 14, p. 854.
79. Brown F., Gravel Ch. L. "Phys. Rev.", 1955, v. 97, p. 55.
80. Горбунов Н. Д., Матвеев Г. А. Ферриты и магнито-диэлектрики. М., «Советское радио», 1968.
81. Menzer G. "Z. Kristallogr.", 1928, Bd 69, S. 300.
82. Gibbs G. V., Smith J. V. "Amer. Mineral.", 1965, v. 50, p. 2023.
83. Prandl W. "Z. Kristallogr.", 1966, Bd 123, S. 81.
84. Abrahams S. C., Geller S. "Acta crystallogr.", 1958, v. 11, p. 437.
85. Néel L. "Ann. Phys.", 1948, v. 3, p. 137.
86. Shafer M. W. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 1145.
87. Syono Y., Akimoto S., Kohn K. "J. Phys. Soc. Japan", 1969, v. 26, p. 993.
88. Longo J. M., Kafalas J. A. "J. Appl. Phys.", 1969, v. 40, p. 1601.
89. Смоленский Г. А. и др. «Физика твердого тела», 1966, т. 8, с. 2965.
90. Callen E. "J. Appl. Phys.", 1968, v. 39, p. 519.
91. Кирюхин В. П., Соколов В. И. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1966, т. 51, с. 428.
92. Shafer M. W. e. a. "Appl. Phys. Lett.", 1967, v. 10, p. 202.
93. Le Craw R. C., Comstock R. L. Physical Acoustics, V III, p B, Lattice Dynamics. Ed. by W. P. Mason. New York — London, Academic Press, 1965.

94. Wickersheim K. A. Magnetism. Ed. G. Rado and H. Suhl. Academic Press, 1963.
95. Kafalas I. A., Longo J. M. "Mater. Res. Bull.", 1968, v. 3, p. 501.
96. Tinkham H. "J. Appl. Phys.", 1962, v. 33, Suppl., p. 1248.
97. Wood D. L., Remeika J. P. "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1038.
98. Dillon J. F., Jr. "J. phys. et radium", 1959, v. 20, p. 374; "J. Appl. Phys.", 1958, v. 29, p. 539.
99. Криличик Г. С., Четкин М. В. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1961, т. 40, с. 729; 1961, т. 41, с. 673.
100. Писарев Р. В., Синий И. Г., Смоленский Г. А. «Письма ЖЭТФ», 1969, т. 9, с. 112, 264; 1969, т. 57, с. 737.
101. Dillon J. F. "J. Appl. Phys.", 1969, v. 40, p. 1231.
102. Geller S. "Z. Kristallogr.", 1967, Bd 125, S. 1.
103. Бокй Г. Б. Кристаллохимия. М., Изд. МГУ, 1960.
104. Geller S., Gilleo M. A. "Acta crystallogr.", 1957, v. 10, p. 787.
105. Anderson E. E. "J. Appl. Phys.", 1959, v. 303, p. 299.
106. Гуревич А. Г., Гублер И. Е., Сафантиевский А. П. «Физика твердого тела», 1959, т. 1, с. 1860.
107. Sirvetz M. H., Zreimer J. E. "J. Appl. Phys.", 1958, v. 29, p. 431.
108. Wolf W. P., Rodrigue G. P. "J. Appl. Phys.", 1958, v. 29, p. 105.
109. Bertaut F., Forrat F. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1957, v. 96, p. 244.
110. Espinosa G. P. "J. Chem. Phys.", 1962, v. 37, p. 2344.
111. Geller S. e. a. "Phys. Rev.", 1965, v. 137 A, p. 1034.
112. Geller S., Williams H. J., Sherwood R. C. "Phys. Rev.", 1961, v. 123, p. 1692.
113. Geller S., Gilleo M. A. "J. Phys. Chem. Solid.", 1957, v. 3, p. 30.
114. Pauthenet R. Thesis, University of Grenoble, 1958.
115. Geller S. "Phys. Rev.", 1963, v. 131, p. 1080.
116. Белов К. П., Белов В. Ф., Тимофеева В. А. «Кристаллография», 1961, т. 5, с. 699.
117. Rodrigue G. P., Meyer H., Jones R. V. "J. Appl. Phys.", 1960, v. 31S, p. 376S.
118. Pearson R. F. "J. Appl. Phys.", 1962, v. 33S, p. 1236.
119. Miyadai T. "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 2205.
120. Pearson R. F., Cooper R. W. "J. Appl. Phys.", 1961, v. 32S, p. 2655.
121. Miyadai T. "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 17, p. 1899.
122. Guillot M., Pauthenet R. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 1033.
123. Jones R. V., Rodrigue G. P., Wolf W. P. "J. Appl. Phys.", 1958, v. 29, p. 434.
124. Dillon J. F. "Phys. Rev.", 1962, v. 127, p. 1495.
125. Bertaut F., Forrat F. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1956, v. 243, p. 1219.
126. Gilleo M. A., Geller S. "J. Appl. Phys.", 1958, v. 29, p. 380.
127. Gilko M. A., Geller S. "Phys. Rev.", 1958, v. 110, p. 73.
128. Geller S. e. a. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 88.
129. Cunningham J. B., Jr. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 2491.
130. Bozorth R. M., Geller S. "J. Phys. Chem. Solid.", 1959, v. 11, p. 263.
131. Geller S. e. a. "J. Phys. Chem. Solid.", 1959, v. 12, p. 111.
132. Geller S. e. a. "J. Phys. Chem. Solid.", 1960, v. 13, p. 28.
133. Geller S. e. a. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 321.
134. Espinosa G. P. "Inorg. Chem.", 1964, v. 3, p. 881.
135. Geller S. e. a. "Appl. Phys. Lett.", 1963, v. 3, p. 21.
136. Geller S. e. a. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 570.
137. Geller S. e. a. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 542.
138. Iida S. "J. Phys. Soc. Japan", 1967, v. 22, p. 1201.
139. Clark A. E., Strakna R. E. "J. Appl. Phys.", 1961, v. 32, p. 1172.
140. Comstock R. L. "Proc. IEEE", 1965, v. 53, p. 1508.
141. Le Craw R. C., Remeika J. P., Matthews H. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 901.
142. Spencer E. C., Le Craw R. C., Clogston A. "Phys. Rev. Lett.", 1959, v. 3, p. 32.
143. Le Craw R. C. e. a. "Phys. Rev. Lett.", 1963, v. 11, p. 490.
144. Dillon J. E., Jr., Nielsen J. "Phys. Rev. Lett.", 1959, v. 3, p. 30.
145. Calhoun B. A., Overmeyer J., Smith W. V. "Phys. Rev.", 1957, v. 107, p. 993.
146. Geschwind S., Walker L. R. "J. Appl. Phys.", 1959, v. 30, p. 1635.
147. Kohn K., Fukuda R., Iida S. "J. Phys. Soc. Japan", 1967, v. 22, p. 333.
148. Callen E. R. e. a. "Phys. Rev.", 1963, v. 130, p. 1735.
149. Clark A. E., De Savage B. F., Callen E. R. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 35, p. 1028.
150. Mc Duffie G. E., Cunningham J. R., Jr. "J. Appl. Phys.", 1960, v. 31, p. 475.
151. Смоленский Г. А., Чжан-Цзун, Шер Е. С. «Физика твердого тела», 1961, т. 3, с. 1808.
152. Cunningham J. R., Jr. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 2491.
153. Geller S. e. a. «Bull. Syst. Techn. J.», 1964, v. 43, p. 565.
154. Яковлев Ю. М., Лебедь Б. М. «Физика твердого тела», 1962, т. 4, с. 3654.
155. Jonker G. H., Wijn H. P. J., Broun P. B. «Philips Techn. Rev.», 1956/1957, v. 18, p. 145.
156. Braun P. B. "Philips Res. Repts.", 1957, v. 12, p. 491.
157. Kohn J. A., Eckart D. W. "Z. Kristallogr.", 1964, Bd 119, S. 454.
158. Kohn J. A., Eckart D. W. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 968.
159. Ситидзе Ю., Само Х. Ферриты. Пер. с япон. М., «Мир», 1964.
160. Villers G. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1959, v. 248, p. 1974.
161. Pauthenet R., Rimet G. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1959, v. 249, p. 565.
162. Kojima H. "Sci. Repts. Res. Inst. Tôhoku Univ.", 1955, v. A7, p. 502.
163. Tauber A. "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1265.
164. Savage R. O., Jr., Dixon S., Jr., Tauber A. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 873.
165. Taft D. R. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 776.
166. Levine B. F., Nowlin C. H., Jones R. V. "Phys. Rev.", 1968, v. 174, p. 57.
167. Dillon J. F., Jr., Kamimura H., Remeika J. P. "J. Phys. Chem. Solid", 1966, v. 27, p. 1531.
168. Sugawara F. e. a. "J. Phys. Soc. Japan", 1968, v. 25, p. 1553.
169. Бокв В. А. и др. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 3695.
170. Bertaut E. F., Forrat F. "J. Appl. Phys.", 1958, v. 29, p. 247.
171. Cloud W. H. "Phys. Rev.", 1958, v. 111, p. 1046.
172. Bozorth R. M., Walsh D. E. "J. Phys. Chem. Solid", 1958, v. 5, p. 299.
173. Knox K., Geller S. "Phys. Rev.", 1958, v. 110, p. 771.
174. Shafer M. W., Mc Guire T. R. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 984.

30.1. ВВЕДЕНИЕ

Обменное взаимодействие, обуславливающее упорядоченную магнитную структуру вещества, может приводить как к параллельной, так и к антипараллельной ориентации магнитных моментов соседних ионов в кристаллах. Вещества, в которых происходит полная (или почти полная) компенсация антипараллельных моментов отдельных ионов, называют *антиферромагнетиками*. Сведения о магнитной структуре и свойствах антиферромагнетиков можно найти в монографиях [1—7]. Экспериментальные данные по магнитным свойствам антиферромагнетиков, как правило, хорошо объясняются, если представить их магнитную структуру как суперпозицию двух или более вставленных одна в другую подрешеток, в каждой из которых магнитные моменты атомов параллельны друг другу.

30.2. МАГНИТНЫЕ И МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕГКООСНЫХ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ (НА ПРИМЕРЕ MnF_2)

Простейшим двухподрешеточным антиферромагнетиком, свойства которого в настоящее время изучены наиболее детально, является MnF_2 (рис. 30.1). Нейтро-

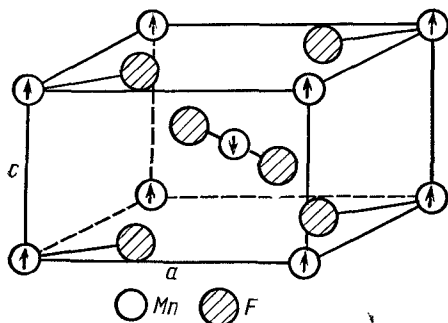


Рис. 30.1. Магнитная структура MnF_2 при $T < T_N$ [6].

нограммы, подтверждающие данную структуру, представлены на рис. 30.2. Температурная зависимость интенсивности разрешенного для магнитного рассеяния пика (100) позволяет определить температуру магнитного упорядочения — температуру Нееля (T_N) (рис. 30.3). Магнитная восприимчивость выше точки Нееля подчиняется закону Кюри — Вейса $\chi = \frac{C}{(T - \theta)}$ ($\theta < 0$);

ниже точки Нееля поведение магнитной восприимчивости зависит от направления внешнего магнитного поля относительно осей кристалла. Одноосные кристаллы, т. е. кристаллы, имеющие одно выделенное направление (для MnF_2 это легкая ось, т. е. ось, вдоль которой в положении равновесия ориентируются магнитные моменты подрешеток), обычно характеризуются магнитной восприимчивостью при поле, параллельном оси ($\chi_{\parallel}$) и при поле, перпендикулярном к оси ($\chi_{\perp}$). При $T = T_N$ магнитная восприимчивость $\chi_{\parallel}$ имеет максимум (рис. 30.4). В точке Нееля имеет также место чет-

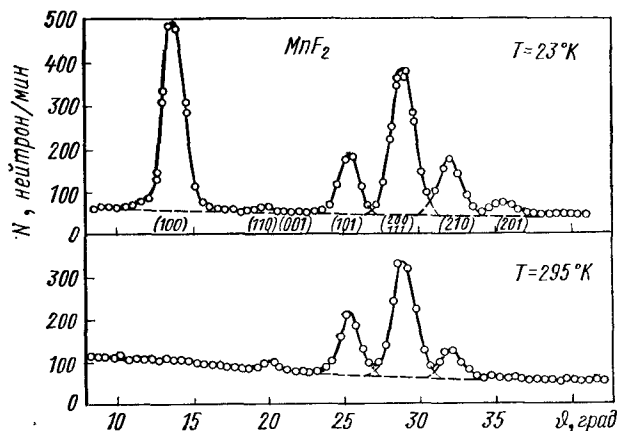


Рис. 30.2. Зависимость числа нейтронов N , рассеянных на угол δ , (нейтронограммы) для MnF_2 в парамагнитном ($T = 295^\circ \text{K}$) и антиферромагнитном ($T = 23^\circ \text{K}$) состояниях [14]. Пики (100) и (201), запрещенные при ядерном рассеянии, разрешены при магнитном рассеянии и появляются при переходе в антиферромагнитное состояние.

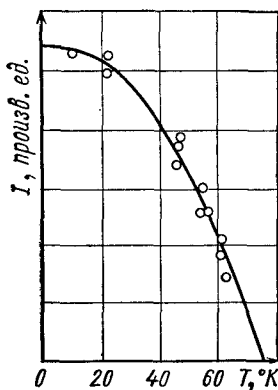


Рис. 30.3. Зависимость интенсивности I пика (100) рассеяния нейтронов для MnF_2 от температуры [14]. (Кружки — экспериментальные данные; сплошная кривая — функция Бриллюэна для $s = 5/2$.)

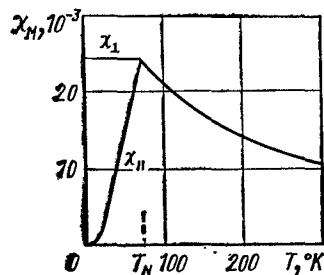


Рис. 30.4. Зависимость восприимчивостей $\chi_{\parallel}$ и $\chi_{\perp}$ монокристалла MnF_2 от температуры [16].

кий максимум на кривой удельной теплоемкости (рис. 30.5). Хотя безусловным критерием существования антиферромагнитного порядка могут служить лишь ре-

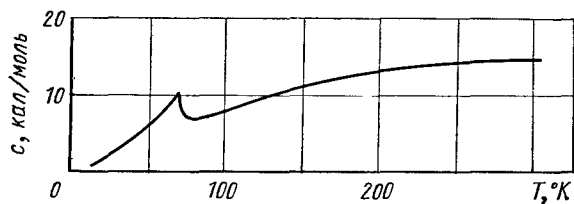


Рис. 30.5. Зависимость удельной теплоемкости MnF_2 от температуры [53].

зультаты экспериментов по дифракции нейтронов, однако наличие аномалий в температурных зависимостях магнитной восприимчивости и теплоемкости позволяет предполагать (с достаточно большой вероятностью) существование в кристалле антиферромагнитного упорядочения.

На рис. 30.6 изображена зависимость намагниченности от напряженности внешнего магнитного поля, па-

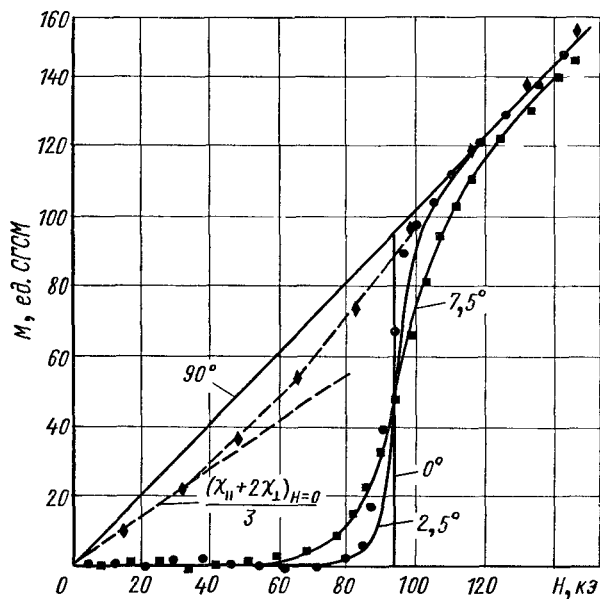


Рис. 30.6. Зависимость намагниченности монокристалла MnF_2 от напряженности магнитного поля, ориентированного вдоль легкой оси ($\theta = 0$) и отклоненного от нее на небольшие углы (θ равно 2,5° и 7,5°); $T = 4,2^\circ \text{ K}$ [30]. Данные для монокристалла: $\bullet$ — $\theta = 2,5^\circ$; $\blacksquare$ — $\theta = 7,5^\circ$; $\blacklozenge$ — данные для порошка; сплошные линии — результат расчета в приближении теории молекулярного поля.

раллельного легкой оси. В критическом поле $H_c = 93,3 \text{ кэ}$ на кривой наблюдается резкий скачок, соответствующий фазовому переходу первого рода между двумя состояниями магнитной структуры. В этом поле происходит опрокидывание магнитных подрешеток («спин-флоп») (рис. 30.7).

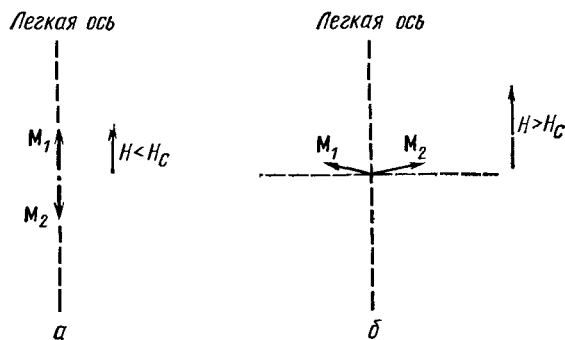


Рис. 30.7. Опрокидывание подрешеток в одноосном антиферромагнетике в магнитном поле, параллельном легкой оси.

На рис. 30.8 представлена магнитная фазовая диаграмма MnF_2 при поле, параллельном легкой осн. Спектр магнонов (или, что то же самое, спиновых волн) для двух направлений волнового вектора $\mathbf{q}$ изображен на

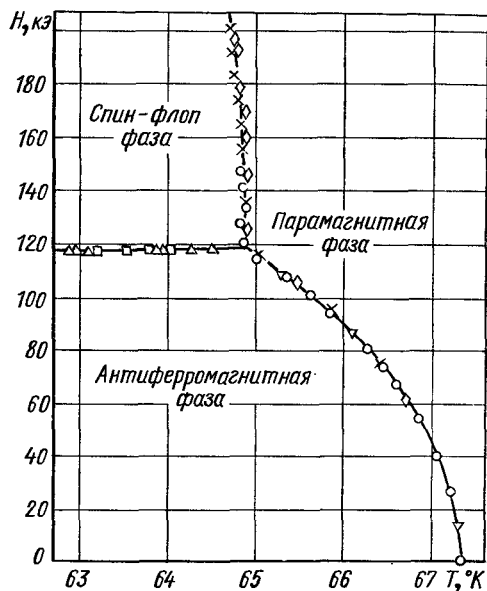


Рис. 30.8. Магнитная фазовая диаграмма MnF_2 в магнитном поле, параллельном легкой оси [25]. Экспериментальные точки получены с помощью измерения поглощения ультразвука в образце; «спин-флоп фаза» — состояние с опрокинутой конфигурацией моментов подрешеток (см. рис. 30.7).

рис. 30.9. Щель в спектре спиновых волн ω_0 (в приближении теории молекулярного поля $\omega_0 = \gamma(\sqrt{H_A H_E} \pm H)$, где H_E и H_A — эффективные поля обмена и аннзотропии, H — напряженность внешнего поля, параллельного легкой оси) определяет частоту антиферромагнитного резонанса (АФМР). Зависимость частоты АФМР в нулевом поле от температуры представлена на

* По-английски spin-flop.

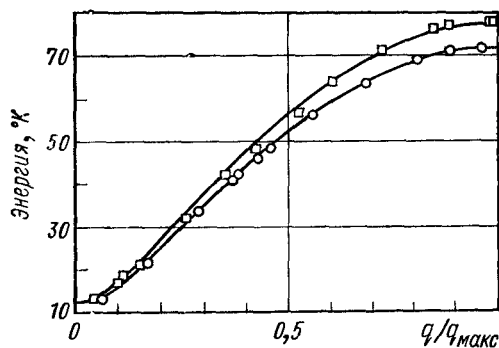


Рис. 30.9 Спектр спиновых волн в MnF_2 при $T = 4,2^\circ\text{K}$ [31]. Дисперсионные кривые определены из неупругого рассеяния нейтронов для двух направлений волнового вектора q : $\square$ — $[1001]$ и $\circ$ — $[100]$.

рис. 30.10. Температурная зависимость напряженности поля, в котором наблюдается АФМР при экстраполяции к нулевой частоте, изображена на рис. 30.11.

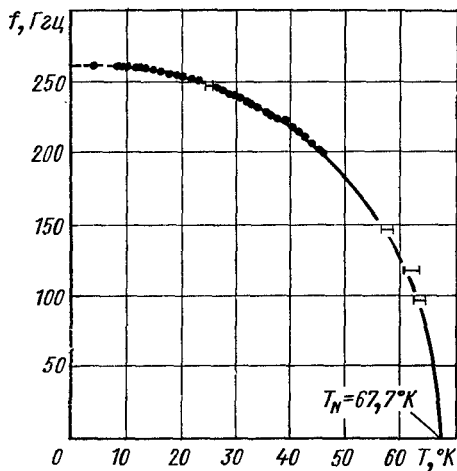


Рис. 30.10. Зависимость частоты АФМР в MnF_2 от температуры [32]. Результаты получены на высоких частотах в малых магнитных полях; горизонтальные черточки указывают погрешность при $H = 0$; сплошная кривая — нормализованная функция Бриллюэна для $s = 5/2$.

В оптических и инфракрасных спектрах антиферромагнетиков имеются особенности, обусловленные магнитным упорядочением и участием магнонов в поглощении (или рассеянии) электромагнитных волн*. Электрически-дипольное поглощение в длинноволновой инфракрасной области, связанное с одновременным

* Вопросы спектроскопии антиферромагнетиков освещены в работах [4, 26].

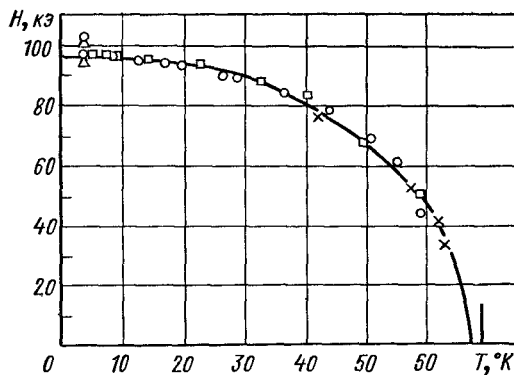


Рис. 30.11. Зависимость напряженности магнитного поля, в котором наблюдается АФМР в MnF_2 на нулевой частоте, от температуры [33]. (Сплошная кривая — нормализованная функция Бриллюэна для $s = 5/2$. Вертикальная черточка в малых полях — данные работы [32].)

рождением двух спиновых волн (двухмагнонное поглощение), иллюстрирует рис. 30.12. На рис. 30.13 изобра-

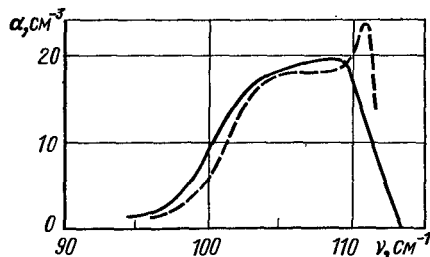


Рис. 30.12. Зависимость коэффициента поглощения α от частоты, характеризующая форму двухмагнонного поглощения, в MnF_2 при $T = 4,2^\circ\text{K}$ [34]. Электрический вектор электромагнитной волны параллелен легкой оси. Сплошная кривая — эксперимент; пунктир — расчет.

жено спектральное распределение коэффициента поглощения света в области дополнительной полосы поглощения, обусловленной экситон-магнонным переходом. Такие полосы в оптических спектрах антиферромагнетиков называют магнонными спутниками; они отделены от чисто электронных переходов интервалом $\approx kT_N$.

На рис. 30.14 представлены характерные изменения величины эффекта Фарадея в красной и фиолетовой областях спектра при антиферромагнитном упорядочивании. На рис. 30.15 показана зависимость угла вращения плоскости поляризации от напряженности магнитного поля, параллельного легкой оси. Объяснение поведения кривых рис. 30.14 и 30.15 можно найти в обзоре [36].

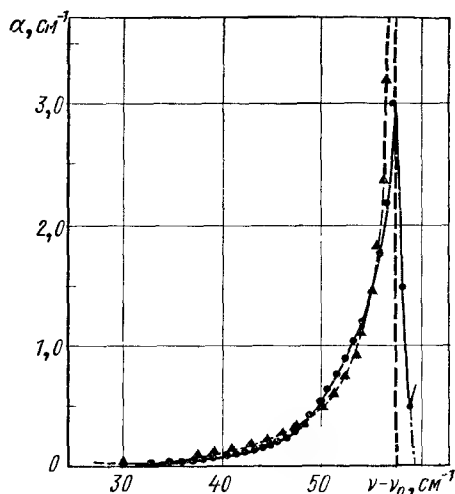


Рис. 30.13. Спектральное распределение коэффициента поглощения света в MnF_2 в области экситон-магнонной полосы поглощения при $T = 2,2^\circ \text{K}$ [35].

$\nu_0 = 18\,419,6 \text{ см}^{-1}$ — частота магнитной дипольной линии, соответствующей экситонному возбуждению; максимум спин-волнового спутника (электрически дипольной линии) наблюдается при $\nu = 18\,477,1 \text{ см}^{-1}$. ● — расчет; ▲ — эксперимент.

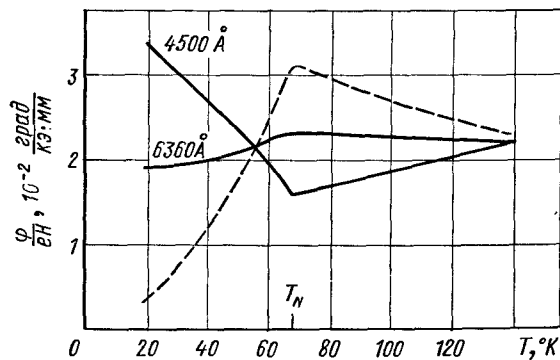


Рис. 30.14. Зависимость величины эффекта Фарадея (ϕ — угол поворота плоскости поляризации, l — толщина образца) в MnF_2 при $H < H_c$ [36, 37] от температуры. Пунктир — магниторезонансное вращение.

30.3. ОСНОВНЫЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЛЕГКО-ПЛОСКОСТНЫХ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ (НА ПРИМЕРЕ MnCO_3)

Большой интерес с точки зрения физических свойств, а также возможного технического применения представляют одноосные антиферромагнетики с анизотропией типа «легкая плоскость» (АФЛП). Выделенное направление в этих кристаллах является трудной осью для магнитных моментов подрешеток. Магнитная анизотропия в перпендикулярной к этому направлению плоскости (базисной плоскости) обычно много меньше осевой анизотропии, и ею часто пренебрегают. Кривые на-

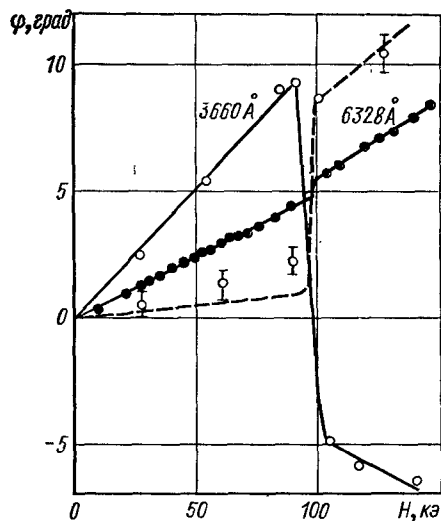


Рис. 30.15. Зависимость величины эффекта Фарадея (угла поворота плоскости поляризации ϕ) от магнитного поля, параллельного легкой оси [36]. (Пунктир — магниторезонансное вращение; толщина образца — $2,3 \text{ см}$, $T = 20^\circ \text{K}$.)

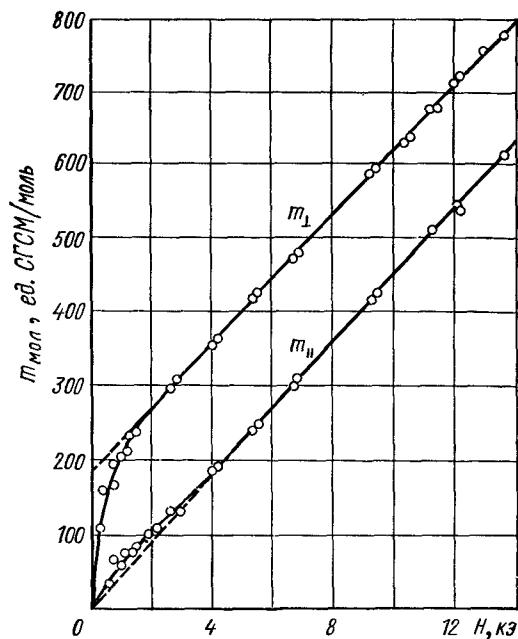


Рис. 30.16. Зависимость молярного магнитного момента m от напряженности поля H в типичном АФЛП MnCO_3 при $T = 4,2^\circ \text{K}$ [8], $m_{\perp}$ — поле направлено вдоль трудной оси; $m_{\parallel}$ — в базисной плоскости. (Наличие в образце спонтанного момента обусловлено взаимодействием Дзялошинского, а не типом анизотропии.)

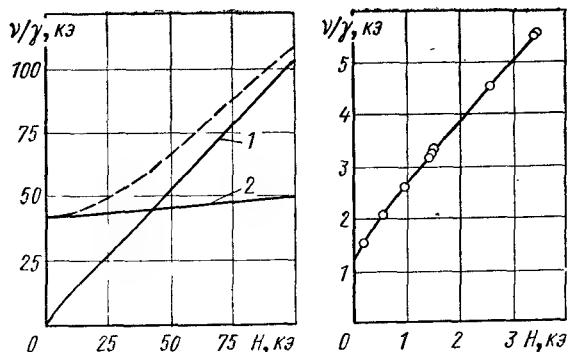


Рис. 30.17. Спектр АФМР в MnCO_3 при $T = 4,2^\circ \text{K}$ [17].

Сплошные кривые — поле приложено в базисной плоскости; пунктир — перпендикулярно к ней; 1 — квазиантиферромагнитная ветвь колебаний; 2 — квазиферромагнитная ветвь. На рисунке справа экспериментальные результаты работы [41] для малых значений поля.

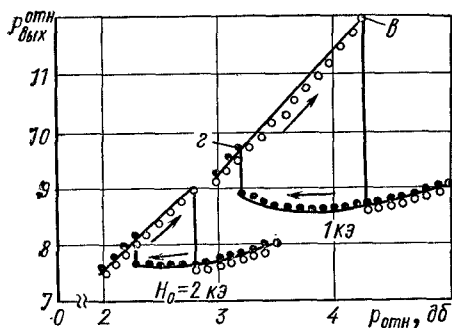


Рис. 30.18. Зависимость прошедшей мощности от мощности на входе резонатора при фиксированных значениях магнитного поля H_0 (поле приложено в базисной плоскости) для MnCO_3 при $T = 1,7^\circ \text{K}$, $\lambda_{\text{СВЧ}} = 8 \text{ мм}$ [13]. В точке *a* — скачкообразное возбуждение спин-волновых пар, в точке *б* — их гашение (срыв).

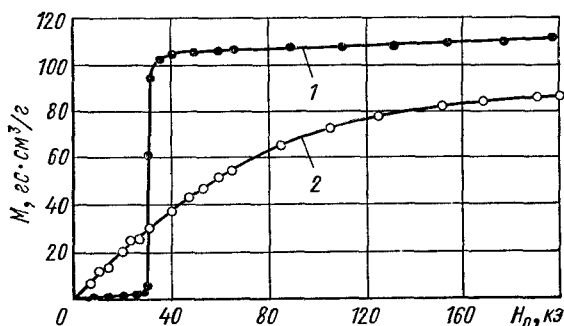


Рис. 30.19. Кривые намагничивания FeBr_2 [38]: 1 — метамгнитное состояние, $T = 4,2^\circ \text{K}$; 2 — парамагнитное состояние, $T = 20,4^\circ \text{K}$.

магничивания и спектр АФМР в кристаллах, обладающих такого типа анизотропией, существенно отличаются от соответствующих характеристик легкоосных антиферромагнетиков (рис. 30.16 и 30.17).

Две ветви АФМР и АФПЛ различаются прежде всего симметрией участвующих в колебаниях компонент намагниченностей подрешеток [39]. Квазиферромагнитная ветвь (рис. 30.17) имеет щель $\omega_{\text{АФМР}}(H=0)$, определяемую средним геометрическим большого обменного поля и очень малого поля эффективной анизотропии в базисной плоскости. В последнюю, благодаря малости магнитокристаллографической анизотропии в базисной плоскости, могут давать заметный вклад магнитоупругое [40] и (при низких температурах) сверхтонкое [41] взаимодействия. Аналогичным образом большое обменное поле усиливает влияние магнитоупругого взаимодействия на спектр фононов, приводя к сильной зависимости скорости звука в АФЛП от напряженности магнитного поля (точнее, от его компоненты, параллельной легкой плоскости, — см. [10]). Особенности спектра спиновых волн в АФЛП приводят к возможности параметрического (порогового) возбуждения спиновых волн в этих кристаллах [12]. В MnCO_3 при параллельной ориентации высокочастотного и статического магнитных полей параметрическое возбуждение спиновых волн квазиферромагнитной ветви происходит с участием вынужденных колебаний квазиантиферромагнитной ветви и может иметь скачкообразный характер — рис. 30.18 [13]. Кроме свойств MnCO_3 в настоящее время изучены свойства и других АФЛП: CoCO_3 , NiCO_3 , FeF_3 , FeBO_3 , $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, ($T_M < T < T_N$), CsMnF_3 и др. (табл. 30.1).

30.4. МЕТАМАГНЕТИКИ

Под метамгнетиками в настоящее время понимаются антиферромагнетики, у которых эффективное поле магнитной анизотропии больше эффективного поля обменного взаимодействия: $H_A > H_E$. Типичное поведение кривых намагничивания метамгнетиков на примере FeBr_2 демонстрирует рис. 30.19. При $T < T_N$ и поле $H = H_0$ вещество переходит из антиферромагнитной фазы в ферромагнитную, минуя фазу с опрокинутыми подрешетками (спин-флоп фазу). Ниже приводятся температура упорядочения и значение поля перехода (при $T < T_N$) некоторых типичных метамгнетиков [5]:

	$T, ^\circ \text{K}$	$H, \text{кз}$
FeCl_2	23,5	10,5
FeBr_2^*	11	31
FeCO_3	38	150

Более подробные сведения о свойствах метамгнетиков можно найти в монографиях [1, 5].

30.5. АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ С ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ДЗЯЛОШИНСКОГО

Существует целый ряд антиферромагнитных кристаллов, при описании магнитных свойств которых, кроме изотропного обменного взаимодействия, определяю-

* T_M (точка Морина) — температура, при которой $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ переходит из легкоосного состояния в легкоплоскостное.

2* Кристалл FeBr_2 обладает антиферромагнитной слоистой структурой, характерной для многих метамгнетиков (два соседних слоя металлических ионов имеют антипараллельное направление магнитных моментов).

щего собственно магнитное упорядочение, необходимо учитывать специфическое анизотропное взаимодействие обменно-релятивистского происхождения — взаимодействие Дзялошинского (ВД)*. ВД, как правило, приводит к небольшому наклону магнитных моментов подрешеток друг относительно друга и образованию слабого ферромагнитного момента. Антиферромагнетики, обладающие слабым спонтанным моментом (MnCO_3 , CoCO_3 , $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ($T > T_M$), CuF_2 , NiF_2 , RFeO_3 , где R редкоземельные элементы NaNiF_3 , YCrO_3 и др.) часто называют слабыми ферромагнетиками^{2*}. В случае, когда подрешеток больше двух, их скос может не приводить к появлению спонтанного момента^{3*}. В четырехподрешеточных антиферромагнетиках (например, Cr_2O_3 [9], CoSO_4 , $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [5]) две подрешетки дают слабый суммарный момент $+m$, а две другие $-m$, так что полный момент образца равен нулю. Существует много кристаллов (наиболее характерные примеры: $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ при $T < T_M$; CoF_2), в которых при $H = 0$ ВД не приводит к скосу магнитных моментов подрешеток, однако его необходимо учитывать для адекватного описания магнитных свойств таких кристаллов в сильных магнитных полях [15,78].

30.6. ПЬЕЗОМАГНЕТИКИ И МАГНИТОЭЛЕКТРИКИ^{4*}

Пьезомагнетики — вещества, у которых при наложении упругих напряжений возникает спонтанный магнитный момент, пропорциональный первой степени величины напряжений. Пьезомагнитный эффект сравнительно мал и практически легче всего может быть обнаружен именно в антиферромагнетиках, которые не обладают в нормальных условиях спонтанным моментом. Появление спонтанного момента в таких кристаллах объясняется изменением их магнитной структуры вследствие деформации при наложении упругих напряжений [2]. Пьезомагнитный момент (m_i) связан с тензором упругих напряжений (σ_{ik}) соотношением $m_i = \Lambda_{ijk}\sigma_{jk}$. Для MnF_2 и CoF_2 в соответствии с требованиями симметрии отличны от нуля только три компоненты пьезомагнитного тензора: $\Lambda_{xyz} = \Lambda_{yxz}$ и Λ_{zxy} . При $T = 20,4^\circ\text{K}$ эти компоненты для CoF_2 имеют значения $\Lambda_{xyz} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ гс} \cdot \text{см}^2 / \text{кг}$ и $\Lambda_{zxy} = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ гс} \cdot \text{см}^2 / \text{кг}$ [18]. В случае MnF_2 эффект примерно в 100 раз меньше. Пьезомагнитный эффект обнаружен также в FeCO_3 [19], $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [20] и др.

Магнитоэлектрики — вещества, у которых при помещении их в электрическое поле возникает магнитный момент, пропорциональный значению поля. Впервые магнитоэлектрический эффект был обнаружен в антиферромагнитном кристалле Cr_2O_3 [21]. Значение эффекта характеризуется тензорным коэффициентом пропорциональности (α_{ik}) между возникающим магнитным моментом и приложенным электрическим полем. Для Cr_2O_3 α_{zz} (250°K) $= 5,8 \cdot 10^{-4}$ [22]. Магнитоэлектрический эффект обнаружен также в антиферромагнетиках Fe_2TeO_6 , $\text{Nb}_2\text{Co}_4\text{O}_9$, $\text{Nb}_2\text{Mn}_4\text{O}_9$, $\text{Ta}_2\text{Mn}_4\text{O}_9$ [23] и др.^{4*}

* Термин ВД появился в литературе по магнетизму после феноменологического объяснения Дзялошинским [9] природы слабого ферромагнетизма в некоторых антиферромагнитных кристаллах. Влияние ВД на основные свойства АФ исследовано в работе [10].

^{2*} В зарубежной литературе их называют «скошенными» (canting) антиферромагнетиками.

^{3*} В зарубежной литературе — «скрытое скашивание» (hidden canting).

^{4*} Подробная классификация материалов по их магнитным, электрическим и упругим свойствам, выполненная на основе кристалломагнитной симметрии, дана в обзоре Н. Shmid. «Int. J. Magnetism», 1974, v. 4, p. 337.

30.7. ОРГАНИЧЕСКИЕ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ

Как правило, в органических парамагнетиках, обладающих значительной величиной обменного взаимодействия, магнитного упорядочения, характерного для неорганических веществ, не наблюдается. Объяснение этого явления можно найти, например, в работе [42]. Однако имеются косвенные свидетельства о существовании антиферромагнитного упорядочения в двух органических кристаллах: иодиде дибензолхрома и α -дифенил- β -пикрилгидразиле (ДФПГ). Антиферромагнитное упорядочение в йодиде дибензолхрома обнаружено при $T < 0,75^\circ\text{K}$ по температурной зависимости сигнала ЯМР на протонах [28]. Переход в антиферромагнитное состояние при $T = 0,2 \div 0,3^\circ\text{K}$ обнаружен в ДФПГ по уменьшению интегральной интенсивности электронного парамагнитного резонансного поглощения [27].

30.8. НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Справочный материал относится в основном к магнитным свойствам диэлектриков, обладающих антиферромагнитным упорядочением. Кроме того, приведены данные о магнитных и электрических свойствах некоторых антиферромагнитных полупроводников и металлических сплавов*.

Условные обозначения к табл. 30.1

T_N , $T_N(R)$ — температура антиферромагнитного упорядочивания, температура упорядочения ионов R

χ_m — молярная магнитная восприимчивость ед. СГСМ/моль $= \text{см}^3/\text{моль}$

θ } — постоянные в законе Кюри—Вейса

$\chi_m = c_m / (T - \theta)$; $\theta < 0$

p — эффективное число магнетонов Бора в выражении, определяющем c_m ($c_m = Np^2\mu_B^2/3k$)

n_s — число магнетонов Бора на атом в состоянии насыщения

АФ, П, Ф, СФ — антиферро-, пара-, ферро- и слабоферромагнитные состояния вещества.
П $\rightarrow$ АФ — переход между состояниями

* Сведения о магнитной структуре многих антиферромагнетиков, исследованных техникой нейтронной дифракции, содержатся в работе [3].

В статье Г. А. Смоленского и Г. М. Недлина (В сб.: Физика магнитных диэлектриков. М., «Наука», 1974, с. 8) представлены основные классы антиферромагнитных диэлектриков.

Значения T_N многих антиферромагнетиков можно найти в книге Solids State Physics Literature Guides, 1973, v. 5. Bibliography of magnetic materials and tabulation of magnetic transition temperatures. Comp. by T. F. Connolly, E. D. Copenhaver.

- T_{II} — температура переориентации магнитных моментов относительно кристаллических осей
- σ — спонтанный магнитный момент, $гс \cdot см^3$ (ГСМ)
- $\sigma(T)^*$ — значение спонтанного момента при температуре $T^\circ K$
- μ — магнитный момент иона (атома)
- $\mu_A(T)^*$ — магнитный момент иона (атома) A при температуре $T^\circ K$ (в магнетонах Бора μ_B)
- H_E^* — эффективное обменное поле
- H_A^* — эффективное поле магнитной анизотропии
- H_D^* — эффективное поле, связанное с взаимодействием Дзялошинского [2, 9] (см. разд. 30. 5)
- H_c^* — значение внешнего магнитного поля, при котором наблюдается та или иная особенность в зависимости магнитного момента вещества от магнитного поля
- $H_{рез}^*$ — значение магнитного поля, при котором наблюдается АФМР
- $\Delta H_{рез}$ — ширина линии АФМР по полю при $\chi_{АФМР} = const$
- $\lambda(0)$ — длина волны, соответствующая частоте АФМР в нулевом магнитном поле (при $T \ll T_N$)
- c — ось наивысшей симметрии в тригональной, гексагональной и тетрагональной сингониях
- $[a], [b], [c]$ — кристаллические оси в моноклиновой и орторомбической сингониях
- ρ — удельное сопротивление
- E_g — значение энергетической щели в спектре электронных возбуждений для веществ, обладающих полупроводниковыми свойствами

Индексы в обозначениях отдельных физических величин^{3*}

$\parallel, \perp$ — данная величина относится к направлению, параллельному выделенной в кристалле оси, или направлению, перпендикулярному к ней

$[ikl], [a], [b], [c]$ — данное значение относится к соответствующему кристаллографическому направлению

При числовых значениях магнитной восприимчивости χ :

a — значение восприимчивости в точке Нееля

b — значение восприимчивости при $T \rightarrow 0^\circ K$

v — значение восприимчивости при $T = 293^\circ K$

$г$ — значение восприимчивости при $T = 4,2^\circ K$

d — значение восприимчивости при $T = 77^\circ K$

Классификация соединений в таблице дана по магнитному атому. Расположение соединений в таблице соответствует порядковому номеру магнитного атома в таблице Менделеева. Соединения с одним и тем же магнитным атомом расположены в порядке возрастающей сложности (например, соединения, состоящие из трех элементов вида $R_i A_k B_l$ с магнитным атомом R , расположены в порядке возрастания числа $n = 100i + 10k + j$; при равных числах n соединения расположены в порядке номеров таблицы Менделеева элементов A и B).

* $\sigma(0^\circ), \mu(0^\circ)$ — значения при $T \rightarrow 0$.

2* Если не указана конкретная температура измерения, значение поля дается для $T \ll T_N$.

3* Те же индексы, стоящие при числовых значениях, означают, что данное измерение проводилось в соответствующем направлении.

Свойства антиферромагнетиков

Вещество	Структура		T_N , °К	χ_M , 10^{-3} ед. СГСМ моль	$-\theta$, °К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллическая	магнитная					
KO ₂ *	Тетрагональная D_{4h}^{17}	—	7	—	—	—	[207]
TiH ₂	Кубическая	—	300	0,22 ^a	—	—	[186]
TiCl ₃	—	—	100	—	—	—	[188]
Ti ₂ O ₃	Тригональная D_{3d}^6	—	248	0,24 ^a	2000	—	[187]
α -VS	Гексагональная D_{6h}^4	—	1040; 900 ^{2*}	0,066 ^a	3000	—	[274]
α -VSe	Гексагональная D_{6h}^4	—	163	0,62 ^a	2570	—	[274]
VO ₂	Тетрагональная D_{4h}^{14}	—	343	0,66 ^b	1360	$\chi(T_N + 0) - \chi(T_N - 0) =$ $= 0,58 \frac{\text{ед. СГСМ}}{\text{моль}}$	[280]
VF ₂	Тетрагональная D_{4h}^{14}	—	7	—	80	—	[285]
VCl ₃	Тригональная D_{3d}^6	—	30	—	—	—	[29]
V ₂ O ₃	Тригональная D_{3d}^6	$\mu \parallel c^{3*}$	150—170	—	—	$\rho(T_N + 0)/\rho(T_N - 0) \simeq$ $\simeq 10^9$	[3, 32, 283]
α -Cr	Кубическая O_h^9	$\mu \parallel [100]$ Спиральная	311	0,16 ^b	—	$\mu(78^\circ) = 0,59\mu_B$	[2, 3]
CrN	Орторомбическая ^{4*}	$\mu \parallel [110]$ Удвоение периода по двум направ- лениям	282 ^{5*} ; 273	—	—	$\mu_{Cr}(77^\circ) = 2,4\mu_B$	[3, 286]
CrS	Моноклинная	—	—	—	695	$\rho = 4,22$	[51]
CrSe	Гексагональная D_{6h}^4	Удвоение периода	270—300	—	—	—	[3, 287]
CrSb	Гексагональная D_{6h}^4	$\mu \parallel c$ Слоистая	700—723	1,92 ^a	—	$\mu_{Cr} = 2,84\mu_B$	[3, 288]

* Магнитные свойства KO₂ обусловлены наличием неспаренного электрона у 2p молекулярной орбитали π -типа иона O₂⁻.

^{2*} Из тепловых измерений.

^{3*} Предполагается магнитная структура с чередованием магнитных моментов $+-+-$ вдоль оси c [281].

^{4*} Кубическая (O_h^9 при $T > T_N$).

^{5*} При $T = T_N$ — фазовый переход первого рода [246].

Вещество	Структура		T_N , °К	χ_M , 10^{-8} ед. СГСМ моль	$-\theta$, °К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллическая	магнитная					
CrF_2	Моноклинная C_{2h}^5	Магнитные моменты параллельны длинной связи Cr—F	53	—	—	—	[289]
CrCl_2	Орторомбическая D_{2h}^{12}	Удвоение периода вдоль $[b]$ и $[c]^*$	20	—	—	—	[289]
CrF_3	Тригональная D_{3d}^6	$\mu \parallel (111)$	80	—	160	$c_M = 2,07$ $\sigma(0) = 168$ ед. СГСМ/моль $\mu(4,2^\circ) = 3\mu_B$	[3, 290]
CrCl_3	Тригональная D_3^3 или D_3^5	$\mu \perp c$ Слоистая	17	$6000^a_{\parallel}$	—	$c_M = 1,83$ $H_{c,\parallel} = 5$ кэ, $H_{c,\perp} = 2,6$ кэ ^{2*}	[291]
CrBr_3	Тригональная C_{3i}^2 или D_{3d}^5	$\mu \perp c$ Слоистая	38	—	—	$H_{c,\parallel} = 2$ кэ, $H_{c,\perp} = 8$ кэ ^{2*}	[291]
Cr_2As	Тетрагональная D_{4h}^7	—	393	—	2067	$p = 1,8$	[48]
Cr_2O_3	Тригональная D_{3d}^3	$\mu \parallel c$	306—308	$3,4^b$	—	$\mu_{\text{Cr}}(4,2^\circ) = 2,8\mu_B$ $H_{c,\parallel} = 59$ кэ ^{3*} $\lambda(0) = 189$ мкм	[3, 293]
Cr_2O_5	—	—	100	—	140	—	[50]
Cr_3S_4	Моноклинная C_{2h}^3	—	280	—	547	—	[47]
Cr_3Se_4	Моноклинная C_{2h}^3	—	80	—	60	—	[47]
Cr_5S_6	Гексагональная	—	305 (П→Ф), 158 (Ф→АФ)	—	—	$\Delta\sigma(158^\circ) = 1,85$ ед. СГСМ/г $\rho(77^\circ) = 5 \cdot 10^4$ ом·см	[44]
KCrF_3	Тетрагональная	Слоистая	77	—	—	—	[52]
YCrO_3	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [c]$	141	—	—	$H_{c,[a]} = 33$ кэ ^{4*} , $\mu_{\text{Cr}}(4,2^\circ) = 2,96\mu_B$	[24, 227]
LaCrO_3	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	295; 282 ^{5*}	$1,9^a$	600	$\mu_{\text{Cr}}(4,2^\circ) = 2,45\mu_B$	[45, 227]

* Магнитные моменты ионов параллельны длинной связи Cr—Cl.

2* При $T = 1,7^\circ\text{К}$.3* Значение поля опрокидывания подрешеток при $T = 77^\circ\text{К}$.

4* Значение поля опрокидывания подрешеток; см. работу [250].

5* См. первую сноску на с. 610.

Вещество	Структура		T_N , °K	$\chi_M \cdot 10^{-3}$ ед. СГСМ моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллическая	магнитная					
CeCrO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	257*	—	—	—	[227]
PrCrO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	239*	—	—	$\mu_{Cr}(4,2^\circ) = 2,46\mu_B$	[227]
NdCrO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	224* 10(Nd)	—	—	$\mu_{Cr}(4,2^\circ) = 2,55\mu_B$ $\mu_{Nd}(4,2^\circ) = 1,3\mu_B$	[227]
SmCrO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	192*	—	—	—	[227]
EuCrO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	181*	—	—	—	[227]
GdCrO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	170*	—	—	—	[227]
TbCrO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	1,5— 4,2(Tb): 158*	—	—	$\mu_{Cr}(4,2^\circ) = 2,85\mu_B$	[227]
DyCrO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	2(Dy) 146*	—	—	$\mu_{Dy}(1,5^\circ) = 9,6\mu_B$ $\mu_{Cr}(1,5^\circ) = 2,76\mu_B$	[227]
HoCrO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	12(Ho) ² * 140—141*	—	—	$\mu_{Cr}(4,2^\circ) = 2,94\mu_B$	[227]
ErCrO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	16,8(Er) 133*	—	—	$\mu_{Cr}(4,2^\circ) = 2,90\mu_B$ $\mu_{Er}(4,2^\circ) = 5,2\mu_B$	[227]
TmCrO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	4(Tm) 124*	—	—	$\mu_{Cr}(4,2^\circ) = 2,58\mu_B$ $\mu_{Tm}(4,2^\circ) = 0,8\mu_B$	[3]
YbCrO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	3(Yb) 118*	—	—	$\mu_{Cr}(4,2^\circ) = 2,80\mu_B$	[227]
LuCrO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	112*	—	—	$\mu_{Cr}(4,2^\circ) = 2,51\mu_B$	[227]
PbCrO ₃	Кубическая T_d^6	—	210—250	—	—	$\mu_{Cr}(0^\circ) = 2,2\mu_B$	[3, 55]
CrVO ₄	Орторомбическая D_{2h}^{17}	—	50	—	—	$\mu_{Cr}(4,2^\circ) = 2,1 \pm 0,2\mu_B$	[292]

* Температура упорядочивания моментов хрома. Сведения о магнитной структуре ортохромитов (они имеют, как правило, сложную неколлинеарную структуру) можно найти в работе [3].

² При $T < 12^\circ K$ магнитная структура системы ионов Ho имеет ферро- $[\mu(4,2^\circ) = 3,4\mu_B]$ и антиферромагнитную $[\mu(4,2^\circ) = 7,0\mu_B]$ компоненты [3].

Вещество	Структура		$T_N, ^\circ\text{K}$	$\chi_m \cdot 10^{-3}$ ед. СГСМ	$-\theta, ^\circ\text{K}$	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллическая	магнитная		моль			
UCrO ₄	Орторомбическая D_{2h}^{14}	$\mu \perp [c]$	45	—	—	—	[236]
MgCr ₂ O ₄	Кубическая O_h^7	Неколлин- арная $\mu \parallel [100]$ и $\mu \parallel [010]$	14	—	350	$\mu_{Cr} (4,2^\circ) = 2,63\mu_B$	[3]
ZnCr ₂ O ₄	Кубическая O_h^7	Неколлин- арная	15—16	—	—	—	[3, 46]
ZnCr ₂ Se ₄	Кубическая O_h^7	$\mu \parallel (001)$	115; ($\Pi \rightarrow \Phi$); 22 ($\Phi \rightarrow A\Phi$)	340 ^r	115	$\mu_{Cr} (4,2^\circ) = 3\mu_B$	[3, 54]
Cr ₂ TeO ₆	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \perp c$	$>4,2$	—	—	$\mu (4,2^\circ) = 2,45\mu_B$	[257]
Cr ₂ WO ₆	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \perp c$	$>4,2$	—	—	$\mu (4,2^\circ) = 2,14\mu_B$	[257]
CrK(SO ₄) ₂ · 12H ₂ O	Кубическая T_h^6	—	0,004	2 · 10 ^{6a}	—	—	[29]
Cr(CH ₃ NH ₂) · (SO ₄) ₂ × × 12H ₂ O	—	—	0,02	—	—	—	[49]
α -Mn	Кубическая T_d^3	—	100	—	—	—	[2]
MnO	Кубическая с ромбоэдриче- скими искаже- ниями ниже T_N	$\mu \parallel (111)$	120	6 ^b	610	$c_m = 4,4$ $\lambda(0) = 362 \text{ мкм}$ $\mu = 5\mu_B$	[3, 56, 68]
MnP	Орторомбическая D_{2h}^{16}	При $T < 47^\circ\text{K}$ геликоидаль- ная	291 ($\Pi \rightarrow \Phi$) 50* ($\Phi \rightarrow A\Phi$)	—	—312	$H_{c, [c]} = 2,4 \text{ кЭ}^{2*}$ $H_{c, [b]} = 6,2 \text{ кЭ}$ $c_m = 10,4$	[57, 245]
β -MnS	Гексагональная C_{6v}^4	$\mu \parallel [001]$, $\mu \perp (011)$	165; 110	6 ^a	528	$\mu (4,2^\circ) = 5\mu_B$	[3, 29]
MnSe	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [001]$	247	19 ^a	740	Полупроводник $E_g =$ $= 0,68 \text{ эВ}$	[29, 212]
MnTe	Гексагональная D_{6h}^4	—	307	4,6 ^a	—	Полупроводник $E_g = 1 \text{ эВ}$ $\mu_{Mn} (163^\circ) = 4,6\mu_B$	[3, 29, 213]
MnNi	Тетрагональная	$\mu \perp c$	1140	0,087 ⁶	—	$\mu_{Mn} (0^\circ) = 4\mu_B$ $\mu_{Ni} (0^\circ) < 0,6\mu_B$	[62]
MnCu	Тетрагональная	$\mu \parallel c$	300	—	—	Сплав (69—85% Mn)	[59]

* $T(\Phi \rightarrow A\Phi) = 47^\circ$ по данным работы [245].** $T = 4,2^\circ\text{K}$.

Вещество	Структура		T_N , °K	$\gamma_M \cdot 10^{-3}$ ед. ГГСМ моль	$- \theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллическая	магнитная					
MnRh	Тетрагональная*	—	170	0,8 ^б	260	$c_M = 1,35$	[60]
MnAu	Кубическая O_h^1	—	500— 520	4,3 ^а	337	$c_M = 3,72$; $\mu_{Mn} =$ $= 4,2 \mu_B$	[3, 61]
MnHg	Кубическая O_h^1	$\mu \parallel [100]$ при $T < 193^\circ K$	460; 198	9,4 ^а	—	$\rho(T_N) = 5 \cdot 10^{-5} \text{ ом} \cdot \text{см}$	[3, 58]
MnO ₂	Тетрагональная	$\mu \perp c$	92	2,8 ^б	—	—	[63]
MnS ₂	Кубическая T_h^6	$\mu \parallel c$	48; 20	7,1 ^д	592	$c_M = 4,91$; $\mu(4,2^\circ) =$ $= 5\mu_B$	[3, 64]
MnSe ₂	Кубическая T_h^6	$\mu \parallel c$	75	6,6 ^д	483	$c_M = 4,36$; $\mu(4,2^\circ) =$ $= 5\mu_B$	[64]
MnTe ₂	Кубическая T_h^6	$\mu \perp c$	75—87	6,8 ^д	528	$c_M = 4,78$; $\mu(42^\circ) =$ $= 5\mu_B$	[3, 64]
MnF ₂	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \parallel c$	72	25 ^б _L	113	$c_M = 4,47$ $H_{c \parallel} = 93,3 \text{ кэ}^2$ * $\lambda(0) = 1,11 \text{ мм}$ $\Delta H_{\text{рез}} = 3\text{э}$ при $\nu = 23 \text{ ГГц}$	[56, 185]
MnCl ₂	Тригональная D_{3d}^5	Слоистая	1,96	—	3,3	—	[66]
MnBr ₂	Тригональная D_{3d}^3	$\mu \parallel (011)$ Слоистая	2,16	—	4,66	—	[67]
MnI ₂	Тригональная D_{3d}^3	Геликондальная $\mu \parallel (307)$	3,4	—	—	$\mu(1,3^\circ) = 4,6\mu_B$	[214]
MnSn ₂	Тетрагональная D_{4h}^{18}	$\mu \parallel c^*$	330	—	—	$\mu(77^\circ) = 2,36\mu_B$	[65]
MnAu ₂	Тетрагональная D_{4h}^{17}	Спиральная	363	—	—	—	[69]
MnF ₃	Моноклинная	Слоистая	47	75 ^б	—8	$c_M = 3,1$ $\mu(0^\circ) = 2\mu_B$	[70]
MnAu ₃	—	—	145	77,5 ^б	—200	$c_M = 2,5$	[61]
Mn ₂ As	Тетрагональная D_{4h}^7	—	573	—	1947	$\rho = 2,58$	[97]
TbMn ₂	Кубическая	Спиральная	40	—	—	—	[73]
Mn ₂ O ₃	Кубическая T_h^7	—	80	—	—	—	[71]

* При $T > T_N$ — кубическая (O_h^1).2* Значение поля опрокидывания подрешеток при $T = 4,2^\circ K$.3* При $T < 7,3^\circ K$ сложная модулированная спиновая структура.

Вещество	Структура		T_N , °K	$\frac{\chi_M \cdot 10^{-3}}{\text{ед. СГСМ}} \cdot \frac{1}{\text{моль}}$	θ , °K	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллическая	магнитная					
Pd_3Mn_2	—	—	593	0,02 ^a	430	—	[72]
Mn_3Ge_2	—	—	283(П→ →Ф); 164 (Ф→АФ)	—	—300	$c_M = 0,775$ $\Delta\sigma(164^\circ) = 3,5$ ед. СГСМ/з	[74]
MnCO_3	Тригональная D_{3d}^6	$\sigma \perp c$	32	43 ^b	64,5	$\sigma(0^\circ) = 188$ ед. СГСМ/моль $\lambda(0) = 2,3$ мм $H_D = 4,4$ кэ	[75]
MnSiO_3	Триклинная	—	—	12,4 ^b	45	$\rho = 5,91$	[77]
CaMnO_3	Кубическая (приближенно) O_h^1	Удвоение периода по трем направлениям	130; 95	4,7 ^a	425	$\sigma(0^\circ) \neq 0$	[3, 84]
ScMnO_3	Гексагональная C_{6v}^3	—	120	—	—	$\mu_{\text{Mn}}(4,2^\circ) = 4\mu_B$	[3, 99]
MnTiO_3	Тригональная C_{3i}^2	$\mu \parallel [111]$	60—65; 41	—	210	$c_M = 4,15$ $H_{c*} \parallel = 52$ кэ $\mu(4,2^\circ) = 4,55 \mu_B$	[3, 76]
MnGeO_3	Орторомбическая D_{2h}^{15}	$\mu \parallel [b]$	16	—	310; 46	$\rho = 6,02$	[86, 234]
MnYO_3	Гексагональная	—	46	—	—	$\sigma(0^\circ) \neq 0$	[47]
LaMnO_3	Кубическая (приближенно)	Слоистая	131; 100	48,4 ^a	—40	$\sigma(0^\circ) = 1210$ ед. СГСМ/моль	[3, 85]
HoMnO_3	Гексагональная C_{6v}^3	—	76	—	—	$\mu_{\text{Mn}}(4,2^\circ) = 3,5 \mu_B$	[3, 99]
ErMnO_3	Гексагональная C_{6v}^3	—	79	—	—	$\mu_{\text{Mn}}(4,2^\circ) = 3,5\mu_B$	[3, 99]
TmMnO_3	Гексагональная C_{6v}^3	—	86*	—	—	$\mu_{\text{Mn}}(4,2^\circ) = 3,8 \mu_B$	[3, 99]
LuMnO_3	Гексагональная C_{6v}^3	—	91	—	—	$\mu_{\text{Mn}}(4,2^\circ) = 3,7 \mu_B$	[3, 99]
NaMnF_3	Орторомбическая	$\sigma \parallel [c]$	67	—	—	$H_E = 390$ кэ $H_D = 4,3$ кэ $H_A = 200$ э	[103]

* Нет уверенности, что наблюдается переход П → АФ.

Вещество	Структура		T_N , °K	$\chi_M \cdot 10^{-3}$ ед. СГСМ моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллическая	магнитная					
KMnF ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	88,3	17,7 ^a	238	$c_M = 4,73$ $\sigma(4,2^\circ) =$ $= 19,3$ ед.СГСМ/моль*	[80]
RbMnF ₃	Кубическая	$\mu \parallel [111]$	54	17,7 ^a _⊥	190	$c_M = 4,22$ $H_{C, \parallel} = 2,8$ кэ $H_A = 4,5$ э $H_E = 890$ кэ	[81]
CsMnF ₃	Гексагональная D_{6h}^4	$\mu \perp c$	64; 53	40 ^г	—	$H_{A, \parallel} = 7,5$ кэ $H_{A, \perp} = 1,1$ э $H_E = 3,5 \cdot 10^5$ э	[83]
TlMnF ₃	Кубическая	—	83; 76	—	125	$H_E = 680$ кэ $H_A = 6,7$ кэ $\mu(4,2^\circ) = 4,9 \mu_B$	[224, 225]
KMnCl ₃	Тетрагональная [c]/[a]=1,005	—	100	—	—	—	[82]
RbMnCl ₃	Кубическая (приближенно)	—	92	—	—	—	[82]
CsMnCl ₃	Кубическая (приближенно)	—	70	—	—	$\Delta H(6^\circ) = 36$ э ² *	[82]
MnSO ₄	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	11	—	—	—	[78]
MnUO ₄	Орторомбическая D_{2h}^{28}	слоистая	12	200 ^a	8	$c_M = 4,38$	[79]
Mn(OH) ₂	Тригональная D_{3d}^3	$\mu \parallel c^{3*}$	12	—	28	$c_M = 4,26$	[266]
MnGa ₂ O ₄	Кубическая O_h^7	$\mu \parallel [111]$	33	—	—	$\mu_{Mn}(4,2^\circ) = 3,6 \mu_B$	[100]
K ₂ MnF ₄	—	—	45	—	—	—	[222]
α -Cs ₂ MnCl ₄	Орторомбическая	—	0,934*	—	4	—	[240]
MnNb ₂ O ₆	Орторомбическая D_{2h}^{14}	$\mu \parallel [100]^{5*}$	4,40 ^{6*}	—	—	—	[265]
Mn _{2-x} Cr _x Sb 0,025 < x < 0,2	Тетрагональная D_{4h}^7	—	550 ^{7*} ($\Pi \rightarrow \Phi$ при x=0)	—	—	$\sigma_{x=0} = 5220$ ед. СГСМ/моль	[89]

* Спонтанный момент появляется ниже $T=81,5^\circ\text{K}$. Изменение магнитной структуры при $T=81,5^\circ\text{K}$ является фазовым переходом первого рода.

^{2*} Ширина линии АФМР на частоте 9,5 Гц.

^{3*} В плоскости, перпендикулярной к c, имеет место винтовая структура.

^{4*} Из тепловых измерений.

^{5*} Моменты почти параллельны оси [100].

^{6*} Из измерений магнитоэлектрического эффекта.

^{7*} $T \Phi \rightarrow \text{АФ}(x) = 120 \div 385^\circ\text{K}$ [89].

Вещество	Структура		T_N , °K	$\chi_m \cdot 10^{-3}$ ед. СГСМ моль	$-b$, °K	Дополнительные сведения	Литера- тура
	кристаллическая	магнитная					
$Mn(C_5H_5)_2$	—	—	134	—	492	$p = 7,18$	[98]
Mn_2SiO_4	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [a]^*$	50	18,8 ^b	163	$c_m = 4,27$	[3, 87]
Mn_3GaC	Кубическая	—	246(П→ →Ф), 150 (Ф→АФ)	—	—	—	[102]
Mn_3ZnN	Кубическая O_h^1	—	183 (П→Ф); 140 (АФ ₁ → АФ ₂)	—	—	—	[232]
$CsMn_3Cl_5$	Тетрагональная	—	0,59 ^{2*}	—	0,9	—	[240]
$Nb_2Mn_4O_9$	Тригональная D_{3d}^4	—	125; 110 ^{3*}	32 ⁶	250	$c_m = 17,2$ Магнитоэлектрик $\mu_{Mn}(4,2^\circ) = 5\mu_B$	[3, 88, 293]
$Ta_2Mn_4O_9$	Тригональная D_{3d}^4	—	103 ^{8*}	—	—	Магнитоэлектрик	[264; 293]
$Dy_2Mn_4O_9$	Орторомбическая D_{2h}^9	—	8	—	—	В поле $H=100$ кэ при $T=4$, 2°K максимальный момент вдоль оси $[a]$	[101]
$LiMnPO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [100]$	34—42	33 ^a	80	$c_m = 4,65$	[3, 90]
NH_4MnCl_3	Кубическая O_h^1 при $T > T_N$. Орторомбическая D_{2h}^{16} при $T < T_N$	—	105	—	—	—	[263]
$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	Моноклиная C_{2h}^5	—	1,62	—	1,79	$H_{c, \parallel} = 2,5 \div 5,0$ кэ ^{4*}	[91, 215]
$MnBr_2 \cdot 4H_2O$	Моноклиная C_{2h}^5	$\mu \parallel [c]$	2,136	—	—	$H_{c, \parallel} = 7,5 \div 10$ кэ ^{4*}	[92, 215]
$MnSiF_6 \cdot 6H_2O$	Тригональная C_{3i}^2	—	0,1	—	—	—	[104]
$Cs_2MnCl_4 \cdot 2H_2O$	Триклинная	—	1,80 ^{2*}	—	—	—	[240]

* При $T > T_N = 13^\circ K$; при $T < T_N$ — скошенная спиновая структура [3].

2* Из тепловых измерений.

3* Из измерений магнитоэлектрического эффекта.

4* При $T = 1,2^\circ K$.

Вещество	Структура		T_N , °K	$\chi_M \cdot 10^{-3}$ ед. СГСМ моль	— θ , °K	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллическая	магнитная					
$Mn(C_2H_3O_2) \cdot 4H_2O$	Моноклиная		3,2	—	5,2	$c_M = 3,19$ $\sigma(0^\circ) = 2790$ ед.СГСМ/моль	[94]
$Mn(HCOO)_2 \cdot 2H_2O$	Моноклиная C_{2h}^5	$\mu \parallel [100]^*$	3,72*	—	—	$c_M = 4,37$	[93]
$Mn(NH_4)_2 \cdot (SO_4)_2 \cdot 6H_2O$	Моноклиная		0,14			$\sigma(0^\circ) =$ $= 7,82 \cdot 10^3$ ед.СГСМ/моль	[95]
FeSi	Кубическая T_4	—	443	—	107	$\rho = 2,55$	[135]
FeP	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	—	—	50	$c_M = 1,46$	[133]
FeO	Кубическая с ромбоэдрическими искажениями при $T < T_N$	—	198; 186	8 ^a	190	$\mu(4,2) = 3,3 \mu_B$ $c_M = 4,6$	[3, 68]
FeS	Гексагональная D_{6h}^4	$\mu \parallel c$ при $T < T_N$ $\mu \perp c$ при $T > T_N$ $T_N \approx 400^\circ K$	593—600	2,2 ^a	917	—	[3, 105]
FeSe	Гексагональная D_{6h}^4	—	847 ^{a*}	—	—	—	[106]
FeTe	—	—	70	—	—	—	[46]
FeRh	Кубическая	—	675 ($\Pi \rightarrow \Phi$) 350 ($\Phi \rightarrow A\Phi$)	15,9 ^d	—680	$\Delta\sigma(350^\circ) =$ $= 117$ ед. СГСМ/моль $\rho(0^\circ) = 5 \cdot 10^{-5}$ ом·см	[107]
FeF ₂	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \parallel c$	78	15,9	117	$c_M = 3,88$ $\lambda(0) = 189$ мкм	[108]
FeCl ₂	Тригональная D_{3d}^5	$\mu \parallel c$ Слоистая	23	320 ⁶	—48	$\mu(4,2^\circ) = 4,2 \mu_B$ $H_{c, \parallel} = 10,5$ кэ	[3, 67]
FeBr ₂	Тригональная D_{3d}^3	$\mu \parallel c$ Слоистая	11	160 ⁶	—6	$c_M = 3,92$ $H_{c, \parallel} = 31,5$ кэ	[38]
FeI ₂	Тригональная D_{3d}^3	—	10	85 ⁶	23	$c_M = 4,29$	[110]
FeP ₂	Орторомбическая D_{2h}^{12}	—	250 ^{4*}	1,18 ^a	17	—	[113]
FeGe ₂	Тетрагональная D_{4h}^{18}	—	77	—	—	—	[137]

* Проявляет свойства, характерные для двумерной модели Изинга [216].

^{a*} При этой температуре упорядочивается только часть магнитных моментов. Остальные моменты обуславливают парамагнитные свойства. При $T = 0,23^\circ K$ наблюдается аномалия Шоттки в поведении теплоемкости [216].

^{b*} При $T = 423^\circ K$ наблюдается переход $A\Phi \rightarrow \Phi$.

^{4*} Нет уверенности, что переход есть $\Pi \rightarrow A\Phi$.

Вещество	Структура		T_N , °K	χ_M , 10^{-3} ед. СГСМ моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллическая	магнитная					
FeSn ₂	Тетрагональная D_{4h}^{18}	—	380	1,95 ^a	230	$c_M = 1,4$	[111]
FeSb ₂	Орторомбическая D_{2h}^{12}	—	773	—	—	—	[112]
FeTe ₂	—	—	85	—	320	$p = 0,194$	[136]
FeF ₃	Тригональная D_{3d}^6	$\mu \parallel (111)$	394; 364	—	—	$\mu(4,2^\circ) = 5\mu_B$	[3, 85]
FeCl ₃	Гексагональная C_{3i}^2	Спиральная	16; 10	—	115	$p = 5,73$ $\mu(4,2^\circ) = 4,3 \mu_B$	[3, 134]
FePt ₃	Кубическая T_d^6	—	120—170	—	—	—	[3, 141]
α -Fe ₂ O ₃	Тригональная D_{3d}^6	$\mu \parallel c$ $0 < T < T_M^*$ $\mu \perp c$ $T_M < T < T_N$	950	—	—	$H_E = 9000$ кэ $H_D = 22$ кэ, ^{2*} $H_{c, \parallel} = 68$ кэ, ^{2*} $H_{c, \perp} = 160$ кэ, $\sigma(300^\circ) = 70$ ед.СГСМ/моль	[114]
FeOCl	Орторомбическая D_{2h}^{13}	—	92	—	—	—	[252]
LiFeO ₂	Тетрагональная	Слоистая $\mu \parallel [001]$	315	—	—	—	[119]
β -FeNaO ₂	Орторомбическая	$\sigma \parallel [b]$ $\mu \parallel [c]$	—	—	—	—	[47]
CuFeS ₂	Тетрагональная D_{2d}^{12}	$\mu \parallel c$	823	1,1	—	$\mu_{Fe} = 3,85 \mu_B$ $E_g = 2,5$ эв	[118]
FeBO ₃	Тригональная D_{3d}^6	$\sigma \perp c$	348	—	—	$H_D = 62$ кэ ^{3*} $\mu_{Fe}(77^\circ) = 4,7 \mu_B$	[3, 254, 255]
FeCO ₃	Тригональная D_{3d}^6	$\mu \parallel c$	35; 20	17 ⁶	14	$H_{c, \parallel} = 150$ кэ	[2, 3]
FeTiO ₃	Тригональная C_{3i}^2	Слоистая $\mu \parallel c$	68; 56	61 ⁶	—17	$c_M = 3,92$	[3, 116]
FeVO ₃	Тригональная D_{3d}^6	—	—	—	—	—	[117]
YFeO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [c]$	643	2,2 ^г	—	$\sigma(4,2^\circ) = 305$ ед. СГСМ/моль $H_c = 72,5$ кэ ^{4*} ($T = 4,2^\circ K$)	[121]

* При $T = T_M = 262^\circ K$ переход СФ → АФ.** При $T = 77^\circ K$ [115].*** При $T = 293^\circ K$.**** В поле $H = H_c$ ($H \parallel [a]$) происходит фазовый переход второго рода, заключающийся в изменении магнитной симметрии кристалла [122].

Вещество	Структура		T_N , °K	$\chi_M \cdot 10^{-3}$ ед. СГСМ моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литера- тура
	кристаллическая	магнитная					
LaFeO ₃ *	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$ Удвоение периода по трем направлениям	738	12 ⁶	480	$\sigma = 243$ ед. СГСМ/моль ^{2*}	[124]
CeFeO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$ $T > T_N$ $T_N = 230^\circ K$	719	—	—	—	[278]
PrFeO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$	—	—	—	—	[123]
NdFeO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	Удвоение периода по трем направлениям	760	—	—	—	[125]
SmFeO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [100]$ при $T < T_N$; $\sigma \parallel [001]$ при $T > T_N$ $T_N = 210^\circ C$	675	—	—	$\sigma = 202 \div \div 210$ ед.СГСМ/моль	[125]
EuFeO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$	666	—	—	$\sigma = 198 \div \div 204$ ед. СГСМ/моль	[125]
GdFeO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	558(Fe) 2,5(Gd)	—	—	$\sigma = 257$ ед. СГСМ/моль	[125]
TbFeO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$ при $T > T_N$ $T_N = 8,4^\circ K$	651(Fe) 3(Tb)	—	—	$\sigma = 340 \div \div 356$ ед. СГСМ/моль	[126]
DyFeO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$ при $T > T_N$; $\sigma = 0$; $T < T_N$ $T_N = 30 \div 35^\circ K$	648(Fe) 3,7(Dy)	—	—	$\sigma = 330$ ед. СГСМ/моль	[126]
HoFeO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [100]$ при $T < T_N$; $\sigma \parallel [001]$ при $T > T_N$ $T_N = 80^\circ K$	647(Fe) 6,5(Ho)	—	—	$\sigma = 236 \div \div 250$ ед. СГСМ/моль	[125]
ErFeO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [100]$ при $T < T_N$; $\sigma = [001]$ при $T > T_N$ $T_N = 102^\circ K$	643(Fe) 4,3(Er)	—	—	$\sigma = 228 \div \div 233$ ед. СГСМ/моль	[125]
TmFeO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [100]$ при $T < T_N$; $\sigma \parallel [001]$ при $T > T_N$ $T_N = 90^\circ K$	630	—	—	$\sigma = 320 \div \div 324$ ед. СГСМ/моль $\Delta H_{рез} = 1$ кэ при $\nu_{ДФМР} = 57,7$ Гц	[125, 127]

* Обзор магнитных свойств ортоферритов (RFeO₃, где R — ион редкоземельного металла) дан в работе [123].** Значения σ в ортоферритах даны для $T < T_N(Fe)$, но $T > T_N(R)$.

Вещество	Структура		T_N , °K	χ_m , 10^{-3} ед. СГСМ моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллическая	магнитная					
YbFeO ₂	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$ при $T > T_N$ $T_N = 9$ °K	634	—	—	$\sigma = 340 \div \div 358$ ед. СГСМ/моль	[125]
LuFeO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	625	—	—	$\sigma = 279$ ед. СГСМ/моль	[125]
BiFeO ₃	Тригональная D_{3d}^6, C_{3v}^6 *	—	643	—	—	—	[142]
KFeF ₃	Тригональная	—	113	—	—	—	[120]
RbFeF ₃	Тетрагональная 2^*	—	102; 75	—	88	При $T_1 = 40$ °K и $T_2 = -87$ °K — изменение структуры (фазовые переходы первого рода); $\sigma \neq 0$ при $T < T_2$	[140, 226]
FePO ₄	Тригональная D_3^4	$\mu \parallel c$	25	—	60	—	[258]
FeSO ₄	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [b]$	21—23	78,5 ^a	30,5	$c_m = 3,98$ $\mu(4,2^\circ) = 4,1 \mu_B$	[3, 42, 78]
UFeO ₄	Орторомбическая D_{2h}^{14}	$\mu \parallel [b]^{3*}$	$\begin{matrix} 55 \\ (\Pi \rightarrow A\Phi) \\ 42 \\ (A\Phi \rightarrow \rightarrow \Phi)^{4*} \end{matrix}$	—	—	$\rho = 3,2 \cdot 10^7$ см·см	[237]
BaFeF ₄	Орторомбическая D_{2v}^{12}	Слоистая ^{5*} $\mu \parallel [010]$	54	1Г	—	$\mu(0^\circ) = 4,2 \mu_B$	[229]
FeSb ₂ O ₄	Тетрагональная D_{4h}^{13}	$\mu \perp c$	—	—	—	—	[261]
Fe ₂ SiO ₄	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [b]^{6*}$	65	20,4 ^b	150	$c_m = 4,25$	[87]
ZnFe ₂ O ₄	Кубическая O_h^7	—	9—16	—	—	$\mu_{Fe}(4,2^\circ) = 4\mu_B$	[3, 46]
Fe ₂ TeO ₆	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \parallel c$	210	—	—	Магнитоэлектрик $\mu(4,2^\circ) = 4,19 \mu_B$	[257]
Ca ₂ Fe ₂ O ₅	Орторомбическая D_{2v}^{16}	$\mu \parallel [c]$ ($c < a < b$)	730	—	—	$\mu(78^\circ) = 4,5 \mu_B$	[144]

* Предполагаемые структуры.

** При $T > T_N$ — кубическая структура; при $T = 40 \div 87$ °K — орторомбическая, при $T < 40$ °K — моноклинная [226].

** Для АФ-структуры.

** В состоянии Ф обладает слабым антиферромагнетизмом.

** Проявляет свойства двумерного антиферромагнетика.

** При $T > T_N = 20-30$ °K, при $T < T_N$ — скошенная спиновая структура [3].

Вещество	Структура		T_N , °K	$\chi_M \cdot 10^{-3}$ ед. СГСМ моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литера- тура
	кристаллическая	магнитная					
$\text{Sr}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$	Орторомбическая D_{2v}^{16}	—	600—700	—	—	$\mu(77^\circ) = 4,5 \mu_B$	[3, 218]
$\text{Na}_3\text{Fe}_5\text{O}_9$	Моноклинная C_{2h}^6	$\mu \parallel [001]$	381	—	—	$H_{9\Phi} = 510 \text{ кэ}$ *	[143]
$\alpha\text{-FeOOH}$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [b]$	370	—	—	—	[3, 138]
LiFePO_4	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	53	—	—	$H_E = 430 \text{ кэ}$	[268]
$\text{Ca}_2\text{FeAlO}_5$	Орторомбическая D_{2h}^{23}	$\mu \parallel [a]$	60	—	—	—	[270]
$\text{FeCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Моноклинная C_{2h}^3	μ составляет с осью $[a]$ угол 58°	23	—	—	Метамagnetик $H_{c,1} = 39,2 \text{ кэ}$ $H_{c,2} = 45,6 \text{ кэ}$	[139]
$\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Моноклинная	$\mu \parallel [b]$	1	1050 ^a	—	—	[130]
$\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$	Моноклинная C_{2h}^5	—	0,129	—	—	—	[128]
$\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	—	—	20	—	—	—	[129]
$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Моноклинная C_{2h}^5	$\sigma \parallel [b]$	20	307 ^b _[b]	—	$\sigma = 4460 \text{ ед. СГСМ/моль}$	[131]
$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Моноклинная	$\mu \parallel (ac)$	4—11	—	—	—	[132]
$\text{Fe}(\text{HCOO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Моноклинная C_{2h}^5	—	3,75; 3,68	—	—	$\sigma \neq 0$	[93, 216]
$\text{Fe}(\text{NH}_4)(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	—	—	0,043	1000 ^a	—	—	[29]
CoO	Кубическая с тетрагональными искажениями ниже T_N	$\mu \parallel [117]$	328; 291	5,3 ^a	280	$c_M = 305$	[3, 68, 145]
CoS	Гексагональная D_{6h}^4	—	358	—	632	$p = 1,7$	[135]
CoF_2	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \parallel [001]$	37,7	50 ^b	52,7	$c_M = 3,29$ $H_{c,\perp} = 120 \text{ кэ}^{2*}$ $H_{c,\parallel} = 190 \text{ кэ}$ $\lambda_1(0) = 351 \text{ мкм}^3$ $\lambda_2(0) = 278 \text{ мкм}$	[146]

* Эффективное поле сверхтонкого взаимодействия (усредненное по трем неэквивалентным позициям ионов Fe).

** Значения $H_{c,\parallel}$ и $H_{c,\perp}$ из данных по АФМР [147]. В поле $H_{c,\perp}$ по-видимому, осуществляется фазовый переход первого рода, связанный с изменением симметрии магнитной структуры [273].** При $H \parallel [001]$ g-факторы для $\lambda_1(H)$ и $\lambda_2(H)$ соответственно равны $g_1 = 1,18$ и $g_2 = 2,80$.

Вещество	Структура		T_N , °K	$\frac{\chi_M \cdot 10^{-3}}{\text{ед. СГСМ}}$ моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллическая	магнитная					
CoCl ₂	Тригональная D_{3d}^5	Слоистая $\mu \perp c$	24,9	60 ^б	—20	$c_M = 3,33$ $\mu(4,2^\circ) = 3,1 \mu_B$	[3, 148]
CoBr ₂	Тригональная D_{3d}^3	Слоистая $\mu \perp c$	19	$147_{\perp}^6$, $43_{\parallel}^6$	—	$c_M = 3,34$	[148]
α -CoI ₂	Тригональная D_{3d}^3	Слоистая $\mu \parallel c$	3	—	—	—	[148]
CoSe ₂	Кубическая T_h^6	—	93	—	160	Полупроводник $p=2,2$	[269]
CoF ₃	Тригональная D_{3d}^6	$\mu \perp (111)$	460	—	—	$\mu_{Co}(4,2^\circ) = 4,4 \mu_B$	[3, 85]
Co ₃ O ₄	Кубическая O_h^7 шпинель	—	40	—	53	$\mu_{Co^{3+}} = 0$ $\mu_{Co^{2+}} = 3,26 \mu_B$	[3, 149]
CoCO ₃	Тригональная D_{3d}^6	$\sigma \perp c$	18	52	—	$\sigma(0^\circ) = 1400 \text{ ед. СГСМ/моль}$	[2]
CoTiO ₃	Тригональная C_{3i}^2	$\mu \perp [111]$	37—42	—	15	$c_M = 3,3$	[3, 150]
CoGeO ₃	Моноклинная C_{2h}^6	—	—	8,5	14	$p = 5,33$	[77]
KCoF ₃	Тетрагональная*	—	114; 109	8,5	125	$c_M = 3,07$ $\mu_{Co}(4,2^\circ) = 3,3 \mu_B$	[3, 120, 167]
RbCoF ₃	Тетрагональная $[c]/[a] = 0,997$ при $T = 4,2^\circ\text{K}$	—	98	—	180	$\mu(4,2^\circ) = 3\mu_B$ $p = 5,53$	[151]
RbCoBr ₃	Гексагональная D_{6h}^4	$\mu \parallel c$	36	—	—	$\mu_{Co}(4,4^\circ) = 3,4 \mu_B$	[3, 239]
β -CoSO ₄	Орторомбическая D_{16}^{2h}	—	12	62 ^а	52	$c_M = 3,37$ $H_{c,[a]} = 12 \text{ кэ}$ $\mu(0^\circ) = 3,4 \mu_B$	[42, 78]
CoUO ₄	Орторомбическая D_{2h}^{28}	Слоистая	12	83 ^а	23	$c_M = 3,11$ $\mu_{Co}(4,2^\circ) = 4\mu_B$	[3, 79]
K ₂ CoF ₄	Тетрагональная	—	130	—	—	—	[99]
CoRh ₂ O ₄	То же	—	27	—	30	$c_M = 2,58$	[152]
CoCs ₃ Cl ₅	»	—	0,52	—	—	—	[158]

* Тетрагональные искажения кубической решетки при $T = 78^\circ\text{K}$ 0,2% параметра решетки [167].

Вещество	Структура		T_N , °К	$\chi_m \cdot 10^{-3}$ ед. СГСМ моль	$-b$, °К	Дополнительные сведения	Литера- тура
	кристаллическая	магнитная					
CoCs_3Br_5	Тетрагональная	—	—	—	—	—	[159]
Co_2SiO_4	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	—	17 ^a	15	$c_m = 2,62$	[87]
$\text{Nb}_2\text{Co}_4\text{O}_9$	Тригональная D_{3d}^4	Магнитные ионы образуют цепи вдоль оси c	30; 27*	133	10	$\mu_{\text{Co}}(4,2^\circ) = 3\mu_B$ Магнитоэлектрик $c_m = 12,0$	[3, 88, 293]
$\text{Ta}_2\text{Co}_4\text{O}_9$	Тригональная D_{3d}^4	—	206*	—	—	—	[264]
LiCoPO_4	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [b]$	22	—	—	$H_E = 320 \text{ Кэ}$	[3, 268]
BaCoWO_6	Кубическая O_h^5	μ составляет с осью $[111]$ угол 20°	17	—	—	—	[160]
$\text{CoCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Моноклиная C_{2h}^3	$\mu \parallel [b]$	8	210 ^a	—	Метамagnetик $H_{c1}, [b] = 32 \text{ Кэ}$ $H_{c2}, [b] = 46 \text{ Кэ}$	[153]
$\text{CoBr}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Моноклиная	$\mu \parallel [b]$	9,5	—	0	Метамagnetик $H_{c1}, [b] = 13,7 \text{ Кэ}$ $H_{c2}, [b] = 29,8 \text{ Кэ}$	[154]
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	То же	—	2,292*	178 ^a	20	—	[155]
$\text{CoBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	»	—	3,2	220 ^a	—	$c_m = 2,65$	[156]
$\text{Co}(\text{NC}_5\text{H}_5)_2\text{Cl}_2$	»	—	3,7	2800 ^a	—4	—	[153]
$\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6\text{SiF}_6$	Тригональная	$\sigma \perp c$	0,15	—	—	$\sigma = 0,035 \cdot 2M_0^{3*}$	[157]
$\text{CoCl}_2[(\text{NH}_2)_2\text{CS}]_4$	Тригональная C_{4h}	—	0,922*	—	—	—	[260]
$\text{CoK}_2(\text{SO}_4)_2$	—	—	0,193	—	—	—	[158]
$\text{Co}(\text{HCOO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Моноклиная C_{2h}^5	$\mu \parallel (100)^{4*}$	5,125*	—	—	—	[216, 217]
$\text{Co}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Моноклиная	—	0,084	—	—	$\sigma = 7070 \text{ ед. СГСМ/моль}$	[95]

* Из измерений магнитоэлектрического эффекта.

** Из тепловых измерений.

** $2M_0 = Nng\mu_B s$, где N — число Авогадро; n — число магнитных ионов в молекуле; g — фактор Ланде; μ_B — магнетон Бора; s — спин магнитного иона.

4* Проявляет свойства, характерные для двумерной спиновой системы.

** При этой температуре упорядочиваются только моменты в плоскости (100). Система магнитных моментов плоскости (200) обуславливает парамагнитные свойства ниже $T = 5,12^\circ \text{ К}$.

Вещество	Структура		T_N , °K	χ_m , 10^{-3} ед. СГСМ/моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллическая	магнитная					
NiO	Кубическая с ромбоэдрическими искажениями ниже T_N	$\mu \parallel (111)$	647; 523	—	2470	$\lambda(0) = 274$ мкм	[56, 68, 161]
NiS	Гексагональная D_{6h}^4	$\mu \parallel c$	263*	—	—	$\mu_{Ni} = 2,1 \mu_B$	[3, 162]
NiAs	Гексагональная D_{6h}^4	$\mu \parallel c$	150	—	300	—	[163]
NiF ₂	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\sigma \parallel [010]$	73,2	20	100	$\sigma_0 = 350$ ед. СГСМ/моль $c_m = 1,3$ $\lambda_1 = 3000$ мкм $\lambda_2 = 320$ мкм	[2]
NiCl ₂	Тригональная D_{3d}^5	Слоистая $\mu \perp c$	52	110	—67	$c_m = 1,33$	[164]
NiBr ₂	Тригональная D_{3d}^5	—	60	—	20	$p = 3,0$	[174]
NiCO ₃	Тригональная D_{3d}^6	$\sigma \perp c$	25,2	23,8 ^г	—	$\sigma(4,2^\circ) = 2080$ ед. СГСМ/моль ^{2*} $H_D = 90$ кэ $H_E = 240$ кэ	[220]
NaTiO ₃	Тригональная C_{3i}^2	Слоистая $\mu \perp [111]$	23	23,4 ^б	55; 11	$c_m = 1,3$ $\lambda(0) = 1,6$ мм $\mu_{Ni}(4,2^\circ) = 2,25 \mu_B$	[3, 150, 165, 166]
NaNiF ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel c$	156	—	—	$\sigma_0 = 335$ ед. СГСМ/моль $H_D = 162$ кэ $H_A = 12$ кэ $H_E = 2 \cdot 10^6$ эв ^{3*}	[43]
KNiF ₃	Моноклинная C_{2h}^2	—	275	2,05 ^а	843	$c_m = 2,41$	[120]
RbNiCl ₃	Гексагональная D_{6h}^4	$\mu \parallel c$	11,5	—	—	$\mu(0^\circ) = 1,3 \mu_B$	[219]
CsNiCl ₃	Гексагональная D_{6h}^4	$\mu \parallel c^{4*}$	4,5	$3,5_{\parallel}^b$ $7,3_{\perp}^b$	69	$\mu_{Ni}(2^\circ) = 1,4 \mu_B$ $p = 3,41$	[3, 239]
NiSO ₄	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [b]$	37	15 ^а	82	$c_m = 1,83$ $\mu_{Ni}(4,2^\circ) = 2,1 \mu_B$	[78, 292]

* Переход $\Pi \rightarrow A\Phi$ обладает свойствами, характерными для перехода первого рода; в точке перехода изменяются параметры кристаллической ячейки: $\Delta[a]/[a] = 3 \cdot 10^{-3}$; $\Delta[c]/[c] = 10^{-2}$.

** Результаты измерения намагниченности монокристаллов NiCO₃ в трех взаимноперпендикулярных направлениях представлены в [109].

^{3*} Значения эффективных полей получены из экспериментов по АФМР [168] в предположении анизотропного эффективного g-фактора подрешеток: $g_{xx} \sim g_{zz} = 2,14$, $g_{xz} \sim g_{zx} = 2,5 \cdot 10^{-2}$ (x, y, z направлены соответственно вдоль [a], [b], [c]).

** Магнитная структура состоит из линейных антиферромагнитных цепей.

Вещество	Структура		T_N , °K	$\chi_M \cdot 10^{-3}$ ед. СГСМ моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллическая	магнитная					
BaNiF ₄	Орторомбическая D_{2v}^{12}	—	150	—	—	$\mu_{Ni}(4,2^\circ) = 2\mu_B$	[230]
K ₂ NiF ₄	Тетрагональная D_{4h}^{17}	Слоистая $\mu \parallel c^*$	190; 97	—	600	$H_{c, \parallel}(4,2^\circ) = 180$ кэ	[170, 222, 238]
Rb ₂ NiF ₄	Тетрагональная D_{4h}^{17}	$\mu \parallel c$	190	—	—	$H_{c, \parallel}(4,2^\circ) = 350$ кэ	[169, 222]
NiRh ₂ O ₄	Тетрагональная	—	18	—	20	$c_M = 1,42$ при $T = 20 - 380^\circ K$ $c_M = 2,06$ при $T = 380 - 900^\circ K$	[152]
Tl ₂ NiF ₄	Тетрагональная D_{4h}^{17}	—	190	—	—	—	[169]
Ni ₂ SiO ₄	Орторомбическая	—	—	8,2	—14	$c_M = 1,14$	[87]
GeNi ₂ O ₄	Кубическая O_h^7	$\mu \parallel (111)$	15	—	—	$\mu_{Ni}(4,2^\circ) = 2,2\mu_B$	[3, 47]
Sr ₂ NiMoO ₆	—	—	71,5	—	—	—	[160]
Ba ₂ NiWO ₆	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [111]$ Удвоение периода по трем осям	17	—	—	$\mu_{Ni}(4,2^\circ) = 1,9 \mu_B$	[160]
(NH ₄) ₂ NiF ₄	Тетрагональная D_{4h}^{17}	—	—	—	—	—	[169]
NiCl ₂ ·6H ₂ O	—	—	5,342*	67,86	7	$c_M = 1,18$	[155]
NiBr ₂ ·6H ₂ O	—	—	6,52*	—	—	—	[172]
Ni ₃ B ₇ O ₁₇ I	—	—	120	—	—	—	[175]
Ni(NO ₃) ₂ ·2H ₂ O	Моноклинная	$\mu \parallel [a]$	4,2	1500 ⁶	—2,5	—	[173]
Ni(SO ₃) ₂ ·2H ₂ O	—	—	3,08	100 ⁶	5	$\sigma(0^\circ) = 1,45$ ед. СГСМ/моль	[171]
Ni(NO ₃) ₂ ·6NH ₃	Кубическая	—	1,352*	—	3,3	—	[272]
Ni(HCOO) ₂ ·2H ₂ O	Моноклинная C_{2h}^5	$\mu \parallel (100)^{3*}$	15,74*	—	—	—	[93, 216]

* Обладает свойствами, описываемыми двумерной моделью Изинга.

2* Из тепловых измерений.

3* Проявляет свойства, характерные для двумерной спиновой системы.

4* При этой температуре упорядочиваются магнитные моменты только в плоскостях (100). Система моментов плоскостей (200) обуславливает парамагнитные свойства ниже T_N . При $T = 3,1^\circ K$ наблюдается аномалия Шоттки в поведении теплоемкости.

Вещество	Структура		T_N , °K	$\chi_M \cdot 10^{-3}$ ед. СГСМ/ моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литера- тура
	кристаллическая	магнитная					
$\text{Ni}(\text{NH}_3)_2 \cdot \text{Ni}(\text{CN})_4 \times 2\text{C}_6\text{H}_6$	Тетрагональная C_{4h}^I	$\mu \parallel [c]$	2,37	—	—	$H_{c, \parallel} = 35 \text{ кэ}$ $H_A(1,46^\circ) = 22 \text{ кэ}$	[233]
CuO	Моноклинная C_{2h}^6	Слоистая	230	—	—	—	[85]
CuF_2	Кубическая O_h^5	$\sigma \parallel [010]$	70	—	190	$\sigma \leq 1 \text{ ед. СГСМ/моль}$	[176]
CuCl_2	Моноклинная C_{2h}^I	—	70	—	—	—	[46]
CuBr_2	Моноклинная C_{2h}^I	—	193	—	—	—	[46]
Cu_2S_6	Тетрагональная	—	373	—	1694	$p=43$	[48]
KCuF_3	Тетрагональная D_{4h}^{18}, D_{4h}^{5*}	$\mu \parallel (ab)$	$38-D_{4h}^{18}$ $22-D_{4h}^{5*}$	—	355	$c_M=0,58$ $\mu(4,4^\circ) = 0,49 \mu_B$	[120, 235]
CuSO_4	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [b]$	34,5	12	77,5	$c_M = 0,517$	[78]
CuSeO_4	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [c]$	34	—	—	$\mu(7,2^\circ) = 0,9 \mu_B$	[231]
$\text{CuF}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Моноклинная C_{2h}^3	$\mu \parallel [c]$	26; 11	6 ^a	37	$c_M=0,46$	[3, 70]
$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Орторомбическая	$\mu \parallel [a]$	4,3	25,6 ^b	—5	$H_{c, \parallel} = 6,5 \text{ кэ}$	[2]
$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{D}_2\text{O}^{2*}$	То же	$\mu \parallel [a]$	—	—	—	—	[184]
$\text{Cu}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$	—	—	270	—	—	—	[182]
$\text{Cu}(\text{C}_{12}\text{H}_{23}\text{O})_2$	—	—	230	—	—	—	[183]
$\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	—	—	21 ^{3*}	—	—	—	[177]
$\text{LiCuCl}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Моноклинная C_{2h}^5	$\mu \parallel (ac)$	5,9; 4,4	30 ^a	10	$H_{c, \parallel} = 9 \div 10,5 \text{ кэ}^{4*}$	[178, 251]
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Триклинная C_i^I	—	0,029 ^{3*}	—	—	—	[128]
$\text{CuSeO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	—	—	0,046 ^{3*}	—	—	—	[128]

* Обе структуры наблюдались одновременно [235].

2* Магнитные свойства аналогичны свойствам $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [184].

3* Из тепловых измерений.

4* Значение поля опрокидывания подрешеток ($H \parallel (ac)$) [251].

Вещество	Структура		T_N , °K	$\chi_M \cdot 10^{-3}$ ед. СГСМ	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллическая	магнитная		моль			
$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$	—	—	3,2*; 0,45	65 ^a	—	—	[179, 244]
$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2 \cdot (\text{OH})_2$	Моноклинная C_{2h}^5	—	1,86	41,5 ^b	10	—	[181]
$\text{Cu}(\text{HCO}_2)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}^{2*}$	Моноклинная	—	17	24,8 ^b	175	$\sigma(0^\circ) = 150$ ед. СГСМ/моль $c_M = 0,497$	[180]
$\text{CuK}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	—	—	0,05	—	—	—	[29]
$\text{Cu}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	—	—	250—280	—	—	—	[182]
$(\text{C}_2\text{H}_5\text{NH}_3)_3\text{CuCl}_4$	—	Ферромагнитные слои, связанные слабым антиферромагнитным взаимодействием	10,2	—	—	$H_{E, 1} = 800$ э (между слоями) $H_{E, 2} = 500$ кэ (внутри слоя)	[267]
$\text{Cu}(\text{NH}_3)_4\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	—	—	0,37 ^{3*}	40 ^г	1,2	—	[128]
$\text{Cu}(\text{C}_6\text{H}_5\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Моноклинная	Линейные цепи вдоль $[c]$ ^{4*}	<1,4	—	—	—	[279]
MoF_3	Кубическая O_h^1	—	185	—	—	—	[190]
CeSb	Кубическая (тетрагональные искажения при $T < T_N$)	—	16	—	—	—	[243]
CeBi	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [001]$	26	—	—12	—	[252]
CeCl_3	Гексагональная	—	0,345	—	—	—	[262]
$\text{Ce}_2\text{Zn}_3(\text{NO}_3)_{12} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	Тригональная	—	0,0063	—	—	—	[191]
PrCl_3	Гексагональная	—	0,7	—	—	—	[262]
PrB_6	Кубическая	—	6,9 ^{3*}	—	—	Металл $\rho(300^\circ) = 15 \times 10^{-5}$ ом·см	[259]

* Нет уверенности, что наблюдается переход $\Pi \rightarrow \text{АФ}$.

** Проявляет свойства, характерные для двумерной модели Гейзенберга.

** Из тепловых измерений.

4* Проявляет свойства, характерные для одномерной модели антиферромагнетика.

Вещество	Структура		T_N , °K	$\chi_m \cdot 10^{-3}$ ед. СГСМ моль	θ , °K	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллическая	магнитная					
PrAlO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	—	10 ^д	100	—	[209]
NdS	Кубическая O_h^5	—	8	—	24	$\rho=3,62$	[276]
NdSe	Кубическая O_h^5	—	14	—	9	$\rho=3,40$	[276]
NdTe	Кубическая O_h^5	—	13	—	14	$\rho=3,54$	[276]
NdSb	—	—	16	—	3	$\rho=3,75$; $n_s=2,7$ $H_c=105$ кэ	[203]
NdBi	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [001]$	25	—	1	—	[252]
NdCl ₃	Гексагональная	—	1,035	—	—	—	[262]
Nd(OH) ₃	Гексагональная C_{6h}^2	$\mu \parallel c$	1,7	—	—	—	[271]
SmCl ₃	Гексагональная	—	0,4	—	—	—	[262]
EuSe	Кубическая O_h^5	—	4,7	—	—	Полупроводник Ферромагнетик при $T < 2,8^\circ\text{K}$	[3, 96, 241]
EuTe*	Кубическая O_h^5	—	11; 9,7	440	7	$H_c=75$ кэ $n_s=7$	[192, 253]
EuF ₂	Кубическая O_h^5	—	19,52*; 2	—	—	—	[193, 194]
Eu ₃ O ₄	Орторомбическая	$\mu \parallel [c]$ ($a > b > c$)	5,3	—	—	$H_c=2$ кэ	[205]
EuTiO ₃	Кубическая	—	5,2	—	—3,7	$n_s=6,93$ $H_c=14$ кэ	[206]
EuGd ₂ O ₄	Орторомбическая	—	4,5	—	—	—	[205]
GdP	Кубическая	—	15	480 ^б	2	$H_c=75$ кэ	[197]
GdS	*	$\mu \parallel (111)$	50	—	—	—	[242]
GdCu	—	—	41	—	—	—	[189]

* Магнитные свойства образцов EuTe коррелируют с электрическим сопротивлением, которое может изменяться в широких пределах ($10^8 - 10^{-2}$ ом·см при $T=300^\circ\text{K}$) [253].

** Из измерений АФМР на образцах, содержащих примеси [194].

Вещество	Структура		T_N , °K	$\chi_M \cdot 10^{-3}$ ед. СГСМ моль	$-b$, °K	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллическая	магнитная					
GdAs	Кубическая с тригональными искажениями при $T < T_N$	—	25; 19	—	12	$H_c = 180$ кэ $p = 8,2$; $n_s = 7,2$	[198, 242]
GdSe	Кубическая	$\mu \parallel (111)$	60	—	—	—	[242]
GdAg	Кубическая O_h^1	—	145	40 ^a	82	$p = 8,8$	[204]
GdIn	Кубическая O_h^1	—	28	73,5 ^a	66	$p = 8,1$	[204]
GdSb	Кубическая	$\mu \parallel (111)$	28	—	42	$p = 8,1$	[203]
GdTe	То же	—	80	—	—	—	[242]
GdBi	»	$\mu \parallel (111)$	32	—	—	—	[242]
GdCu ₂	Гексагональная	—	41	—	—	$1/\rho \neq 0$; $p = 8,4$	[196]
GdAlO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [b]$	3,87	—	4,81*	$H_{c, \parallel} (0,5^\circ) = 11$ кэ ^{2*}	[221]
GdVO ₃	Орторомбическая	—	7,5	—	—	$p = 80$	[284]
Gd(OH) ₃	Гексагональная C_{6h}^3	$\mu \parallel c$	2,0	—	—	—	[271]
SrGd ₂ O ₄	Орторомбическая	—	2,8	—	6	—	[205]
GdCl ₃ ·6H ₂ O	—	—	0,182 ^{3*}	—	—	—	[128]
TbP	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [111]$	8—9	—	1	$p = 9,2$; $n_s = 8$ $H_c = 4,3$ кэ $\mu (0^\circ) = 6,2 \mu_B$	[195, 197]
TbAs	То же	$\mu \parallel [111]$	10—12	—	4	$p = 9,7$; $n_s = 7,9$ $H_c = 28$ кэ $\mu = 7,7 \mu_B$	[3, 195, 198]
TbSb	»	$\mu \parallel [111]$	14—16	—	14	$p = 9,7$; $n_s = 7,5$ $H_c = 60$ кэ $\mu (0^\circ) = 8,2 \mu_B$	[195, 203]
TbBi	»	$\mu \parallel [111]$	18	—	33	—	[252]
TbCu ₂	Гексагональная	—	54	—	—	$1/\rho \neq 0$; $p = 9,8$	[196]

* Усредненное значение измерений вдоль осей $[a]$, $[b]$, $[c]$.

** Значение поля опрокидывания подрешеток.

** Из тепловых измерений.

1
1.1

Вещество	Структура		T_N , °К	χ_m , 10^{-3} ед. СГСМ моль	$-\theta$, °К	Дополнительные сведения	Литера- тура
	кристаллическая	магнитная					
Tb ₂ O ₃	—	—	2,4	—	—	—	[247]
TbOCl	Тетрагональная D_{4h}^7	—	4	—	—	$c_M = 12,05$	[228]
Tb ₃ Al ₅ O ₁₂	Кубическая	—	1,5	—	—	—	[210]
DyP	Кубическая O_h^5	*	—	—	—6 с	$p = 9,9$; $n_s = 7,8$ $H_c = 17$ кэ	[197]
DyAs	—	—	8,5	—	—2	$p = 10,4$; $n_s = 8,1$ $H_c = 32$ кэ	[198]
DySb	—	—	9,5	—	4	$p = 10,7$; $n_s = 7,7$ $H_c = 19,5$ кэ	[203]
DyBi	Кубическая O_h^5	—	13	—	30	—	[252]
DyCu ₂	Гексагональная	—	24	—	—	$1/\rho \neq 0$, $p = 10,75$	[196]
DyAg ₂	Тетрагональная D_{4h}^{17}	—	9	—	25	$H_{c, \parallel} = 35$ кэ ^{2*}	[249]
DyAu ₂	Тетрагональная D_{4h}^{17}	—	31	—	13	Метамagnetик	[249]
DyOCl	Тетрагональная D_{4h}^7	—	9	—	—	$c_M = 13,95$ $H_c(4, 2^\circ) = 14$ кэ	[228]
DyAlO ₃	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	3,4	—	—	—	[211]
DyVO ₄ ^{3*}	Тетрагональная D_{4h}^{19}	$\mu \perp c$	3,05	—	—	—	[223]
Dy ₃ Al ₅ O ₁₂	Кубическая O_h^{10}	$\mu \parallel [111]$	2,5	—	—	$\mu_{Dy}(1,35^\circ) = 9\mu_B$	[3,208]
HoP	Кубическая O_h^5	—	5,5 ^{4*}	—	—	$p = 10,2$; $n_s = 9,2$ $H_c = 1,8$ кэ	[197]
HoAs	—	—	4,8	—	—1	$p = 10,5$; $n_s = 9,0$ $H_{c, 1} = 1,8$ кэ $H_{c, 2} = 6$ кэ	[198]
HoSb	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [100]$	9; 5,5	—	2,4	$p = 10,8$; $n_s = 8,7$ $H_c = 15$ кэ $\mu(0^\circ) = 9,3 \mu_B$	[195, 203]
HoCu ₂	Гексагональ- ная	—	9	—	—	$1/\rho \neq 0$, $p = 10,5$	[196]

* При $T = 1,8^\circ\text{К}$ имеет сложную неколлинеарную магнитную структуру [195].

** Значение поля опрокидывания подрешеток.

*** В работе [223] сообщается, что антиферромагнитным упорядочением обладают также GdVO₄, TbVO₄, ErVO₄.

**** Ниже этой температуры имеет сложную неколлинеарную магнитную структуру.

Вещество	Структура		T_N , °K	$\chi_M \cdot 10^{-3}$ ед. СГСМ моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллическая	магнитная					
ErP	Кубическая O_h^5	$\mu \perp [111]$	3—4	—	0	$p = 9,3; n_s = 8,5$ $H_c = 5,2$ кэ $\mu(0^\circ) = 5,7 \mu_B$	[195, 197]
ErAs	—	—	3,5	—	1,5	$p = 9,6; n_s = 8,4$ $H_c = 10,5$ кэ	[198]
ErSb	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [111]$	3,5—3,7	—	3	$p = 9,8; n_s = 7,3$ $H_c = 12$ кэ $\mu(0^\circ) = 7\mu_B$	[195, 203]
ErCu ₂	Гексагональная	—	11	—	—	$1/\rho \neq 0; p = 9,35$	[196]
Er ₂ O ₃	Кубическая O_h^7	—	4	—	—	—	[290]
Yb ₂ O ₃ S	Тригональная D_{3d}^3	$\mu \parallel c$	2,65	—	—	$\mu(1,5^\circ) = 1,6 \mu_B$	[248]
K ₂ ReCl ₆	Кубическая O_h^5	Слоистая (чередующиеся феррослои)	12	—	—	$n_s = 2,6$ $\mu_{Re}(4,2^\circ) = 2,7 \mu_B$	[3, 202]
K ₂ IrCl ₆	Кубическая O_h^5	—	3,08	—	32	—	[199]
(NH ₄) ₂ IrCl ₆	Кубическая	—	2,16	—	20	—	[199]
UN	Кубическая O_h^5	—	50	—	—	$\mu(4,2^\circ) = 0,75 \mu_B$	[3, 256]
UP	Кубическая O_h^5	—	125	—	—49	$p = 3,3$ $\mu(4,2^\circ) = 1,9 \mu_B$	[3, 256, 275]
UAs	Кубическая O_h^5	—	128	—	—	$\mu = 1,9 \mu_B$	[3, 256]
UO ₂	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [111]$	28—31	—	—	$\mu = 1,7 \mu_B$	[3, 200]
UP ₂	Тетрагональная	$\mu \parallel c$	199	—	—80	$p = 2,3$	[275]
UTe ₂	—	—	78	—	—	—	[277]
UBi ₂	Тетрагональная	$\mu \parallel c$	183	—	53	—	[275]
UTe ₃	—	—	56	—	—	—	[277]
NpC	Кубическая O_h^5	—	310 (П→АФ) 200 (АФ→Ф)	—	—	$p = 3,37$ $\mu = 1,4 \mu_B$ *	[201]
NpO ₂	Кубическая O_h^5	—	25,3	—	—	—	[201]

* В ферромагнитном состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вонсовский С. В. Магнетизм. М., «Наука», 1971.
2. Боровик-Романов А. С. «Итоги науки. Физ.-мат. науки», вып. 4. «Антиферромагнетизм», Изд-во АН СССР, 1962.
3. Oleś A. e. a. Tables of Magnetic Structures determined by Neutron Diffraction, Institute of Nuclear Techniques, Cracow. Part I — cubic systems, report N 1/PS, 1970; Part II — tetragonal systems, report N 4/PS, 1970; Part III — rhombohedral and hexagonal systems, report N 7/PS, 1971; Part IV — orthorhombic systems, report N 11/PS, 1971.
4. Боровик Е. С., Мильнер А. С., Еременко В. В. Лекции по магнетизму. Харьков, Изд-во Харьк. ун-та, 1972.
5. Keffer F. Handbuch der Physik. Bd. 18/2, S. 1. Springer, Berlin, 1966.
6. Morrish A. H. The Physical Principles of Magnetism. John Wiley and Sons, Inc., N. Y., 1965.
7. Изюмов Ю. А., Озеров Р. П. Магнитная нейтронография. М., «Наука», 1966.
8. Боровик-Романов А. С. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1959, т. 36, с. 75.
9. Дзялошинский И. Е. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1957, т. 32, с. 1547.
10. Туров Е. А. Физические свойства магнитоупорядоченных кристаллов. М., Изд-во АН СССР, 1963.
11. Ozhogin V. I., Maximenkow P. P. Digests of Inter-mag. conf. Kyoto, 1972, p. 49.4; Seavey M. H. "Solid. State Comm.", 1972, v. 10, p. 219.
12. Borovik-Romanov A. S., Prozorova L. A. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-837.
13. Ожогин В. И., Якубовский А. Ю. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1972, т. 63, с. 2155.
14. Erickson R. A. "Phys. Rev.", 1953, v. 90, p. 779.
15. Ожогин В. И., Шапиро В. Г. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1968, т. 54, с. 96.
16. Bizette H., Tsai B. "Compt. rend.", 1954, v. 238, p. 1575.
17. Боровик-Романов А. С., Прозорова Л. А. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1968, т. 55, с. 1727.
18. Боровик-Романов А. С. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1960, т. 38, с. 1088.
19. Боровик-Романов А. С. Физический энциклопедический словарь. М., 1965, т. 4, с. 250.
20. Андрацкий В. П., Боровик-Романов А. С. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1966, т. 51, с. 1030.
21. Астров Д. Н. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1960, т. 38, с. 984.
22. Астров Д. Н. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1961, т. 40, с. 1035.
23. Hornreich R. M. Digests of the Intermag. Conference, Kyoto, 1972, p. 40, 4.
24. Judin V. M., Sherman A. B. "Solid. State Comm.", 1966, v. 4, p. 661.
25. Shapira Y., Foner S. "Phys. Rev. B", 1970, v. 1, p. 3083.
26. Еременко В. В., Беляева А. И. «Успехи физ. наук», 1969, т. 98, с. 27.
27. Прохоров А. М., Федоров В. Б. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1962, т. 43, с. 2104.
28. Каримов Ю. С., Щеголев И. Ф. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1964, т. 47, с. 1721.
29. Labhart H. "Z. angew. Math. und Phys.", 1953, Bd 4, S. 1.
30. Jacobs I. S. "J. Appl. Phys.", 1961, v. 32, p. 61-S.
31. Low G. G. e. a. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 998.
32. Johnson F. M., Nethercot A. H., Jr. "Phys. Rev.", 1959, v. 114, p. 705.
33. Foner S. "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 336.
34. Allen S. J., Jr., Loudon R., Richards P. L. "Phys. Rev. Lett.", 1966, v. 16, p. 463.
35. Green R. L. e. a. "Phys. Rev. Lett.", 1965, v. 15, p. 656.
36. Харченко Н. Ф., Еременко В. В. Физика конденсированного состояния. Вып. XIII. ФТИ низких температур АН УССР, Харьков, 1971, с. 3.
37. Харченко Н. Ф., Еременко В. В. «Физика твердого тела», 1968, т. 10, с. 1402.
38. Jacobs I. S., Lawrence P. E. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 996.
39. Ожогин В. И. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1970, т. 58, с. 2079.
40. Боровик-Романов А. С., Рудашевский Е. Г. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1964, т. 47, с. 2095.
41. Боровик-Романов А. С., Крейнс Н. М., Прозорова Л. А. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1963, т. 45, с. 64.
42. McConnell H. M., Lynden-Bell R. "J. Chem. Phys.", 1962, v. 36, p. 2393.
43. Judin V. M., Sherman A. B. "Phys. St. Sol.", 1967, v. 20, p. 759.
44. Dwight K. e. a. "J. Appl. Phys.", 1962, v. 33, p. 1341.
45. Koehler W. C., Wollan E. O. "J. Phys. Chem. Sol.", 1957, v. 2, p. 100.
46. American Institute of Physics Handbook (1957), section 5, p. 226.
47. Bertaut E. F. e. a. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 952.
48. Yuzuri M. "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 2007.
49. Motizuki K. "J. Phys. Soc. Japan", 1959, v. 14, p. 759.
50. Hirota E., Kubota B. "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 1715.
51. Benoit R. "J. Chem. Phys.", 1955, v. 52, p. 119.
52. Scatturin V. e. a. "Acta crystallogr.", 1961, v. 14, p. 19.
53. Stout J. W., Adams H. E. "J. Amer. Chem. Soc.", 1942, v. 64, p. 1535.
54. Plumier R. J. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 964.
55. Roth W. L., De Vries R. C. "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 951.
56. Richards P. L. "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1237.
57. Huber E. E., Ridgley D. H. "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1099.
58. Nakagawa Y., Hori T. "J. Phys. Soc. Japan", 1961, v. 16, p. 1470.
59. Street R., Smith J. "J. Phys. Rad.", 1962, v. 20, p. 82.
60. Kouvel J. S. e. a. "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1095.
61. Meyer A. "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 432.
62. Kasper J. S. e. a. "J. Phys. Chem. Sol.", 1959, v. 11, p. 231.
63. Bizette H. "J. Physiq.", 1951, v. 12, p. 161.
64. Hastings J. e. a. "Phys. Rev.", 1959, v. 115, p. 13.
65. Corliss L., Hastings J. "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1192.
66. Douglass D., Strandberg M. "Physika", 1961, v. 27, p. 1.
67. Koehler W. e. a. "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 180.
68. Бейкон Дж. «Успехи физ. наук», 1963, т. 81, с. 335.
69. Asch P. G. "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 349.
70. Bosort R., Nielsen J. "Phys. Rev.", 1958, v. 110, p. 879.
71. Meisenheimer R. C., Cook D. L. "J. Chem. Phys.", 1959, v. 30, p. 605.
72. Burger J. e. a. "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 427.
73. Corliss L. M., Hastings J. M. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 1051.

74. Flippen R., Darnell F. "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1094.
75. Fink H., Shaltiel D. "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1963, v. 8, p. 214.
76. Joenk R. J. "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1097.
77. Sawaoka A., Miyahara S. "J. Phys. Soc. Japan", v. 19, p. 1254.
78. Крейнс Н. М. Диссертация. ИФП АН СССР, М., 1963; «Журн. эксперим. и теор. физ.» 1961, т. 40, с. 762.
79. Bertaut E. e. a. "J. Phys. Rad.", 1960, v. 23, p. 477.
80. Heeger A. J., Beckman O., Portis A. M. "Phys. Rev.", 1961, v. 123, p. 1652.
81. McGuire T. R. "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1963, v. 8, p. 55.
82. Kedzie R. W. e. a. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 1195.
83. Lee K., Portis A. M., Witt G. L. "Phys. Rev.", 1963, v. 132, p. 144.
84. Jonker G. H. "Physika", 1956, v. 22, p. 707.
85. Hirakawa K. e. a. "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 2063.
86. Sawaoka A., Miyahara S. "J. Phys. Soc. Japan", 1964, v. 19, p. 1750.
87. Kondo H., Miyahara S. "J. Phys. Soc. Japan", 1963, v. 18, p. 305.
88. Bertaut E. e. a. "J. Chem. Phys. Sol.", 1961, v. 21, p. 234.
89. Swoboda T. e. a. "Phys. Rev. Lett.", 1960, v. 4, p. 509.
90. Mays J. M. "Phys. Rev.", 1963, v. 131, p. 38.
91. Lasheen M. A., e. a. "Physika", 1958, v. 21, p. 1061.
92. Schelleng J., Friedberg S. "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1087.
93. Pierce R. D., Friedberg S. A. "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1462.
94. Friedberg S., Flippen R. Proc. VIII Intern. Conf. LTP, Toronto, 1960 (Amsterdam, 1961).
95. Uryu N. "J. Phys. Soc. Japan", 1961, v. 16, p. 2140.
96. Busch G. "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1386.
97. Yuzuri M., Yamada M. "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 1845.
98. Wilkinson G. e. a. "Inorg. Nucl. Chem.", 1956, v. 2, p. 95.
99. Koehler W. C. e. a. "Phys. Lett.", 1964, v. 9, p. 93.
100. Boucher B. e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 960.
101. Nowik I. e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 970.
102. Bouchaud J. P. e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 971.
103. Shane J. R. e. a. "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1280.
104. Ohtsubo A. e. a. "Physika", 1958, v. 24, p. 161.
105. Nagamiya T. "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 70.
106. Maxim I. Studii si cercetări fiz Acad. R. P. R., 1959, v. 9, p. 323.
107. Kouvel J. S., Hartelius C. C. "J. Appl. Phys.", 1962, v. 33, p. 1343.
108. Ohlman R., Tinkham M. "Phys. Rev.", 1961, v. 123, p. 425.
109. Бажан А. Н. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1974, т. 66, с. 1086.
110. Bizette H. e. a. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1957, v. 245, p. 507.
111. Kanematsu e. a. "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 2358.
112. Rosenquist T. "Acta Met.", 1953, v. 1, p. 761.
113. Meyer A., Cadeville M. "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 17, S. B—1, p. 223.
114. Восканян Р. А., Левитин Р. З., Щуров В. А. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1967, т. 53, с. 459.
115. Jacobs I. S. e. a. "Intern. J. Magnetism", 1971, v. 1, p. 193.
116. Ishikawa Y., Akimoto S. "J. Phys. Soc. Japan", 1957, v. 12, p. 1083.
117. Berry C., Combs C. "J. Appl. Phys.", 1960, v. 31, p. 1130.
118. Taranishi T. "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 17, S. B—1, p. 263.
119. Cox D. e. a. "Phys. Rev.", 1963, v. 132, p. 1547.
120. Okazaki A., Suemune Y. "J. Phys. Soc. Japan", 1961, v. 16, p. 671.
121. Jacobs I. S., Burne H. F., Levinson L. M. "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1631.
122. Ожогин В. И. и др. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1972, т. 62, с. 2221.
123. Уайт Р. «Успехи физ. наук», 1971, т. 103, с. 593.
124. Treves D. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 1033.
125. Koehler W. e. a. "Phys. Rev.", 1960, v. 118, p. 58.
126. Gorodetsky G., Treves D. "Phys. Rev.", 1964, v. 135A, p. 97.
127. Hagedorn F. B. e. a. "Phys. Rev. Lett.", 1968, v. 21, p. 364.
128. Duffy W. T. e. a. Proc. VIII Intern. Conf. LTP, London, Butterworths, 1963, p. 245.
129. Ono K., Ito A. "J. Phys. Soc. Japan", 1964, v. 19, p. 899.
130. Friedberg S. A., Schriempf J. T. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 1000.
131. Van Agt T. W. e. a. Proc. VIII Intern. Conf. LTP, London, Butterworths, 1963, p. 222.
132. Poulis N., W. v. d. Lugt "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 17, S. B—1, p. 505.
133. Chiba S. "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 581.
134. Cable J. e. a. "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1960, v. 5, p. 458.
135. Benoit R. "J. Chem. Phys.", 1955, v. 52, p. 119.
136. Finlayson D. e. a. "Proc. Phys. Soc. (London)", 1959, v. 74, p. 75.
137. Kren E., Szabo P. "Phys. Lett.", 1964, v. 11, p. 215.
138. Hryniewicz Z. e. a. "Phys. Lett.", 1965, v. 17, p. 93.
139. Narath A., Schirber J. E. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 1124.
140. Wang F. Y., Kestigian M. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 975.
141. Клюшин В. В. и др. «Физика металлов и металловедение», 1966, т. 21, с. 153.
142. Юдин В. М. «Физика твердого тела», 1966, т. 8, с. 267.
143. Schurer P. J. "J. Physiq.", 1971, v. 32, CI—278.
144. Grant R. W. e. a. "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1455.
145. Tachiki M. "J. Phys. Soc. Japan", 1964, v. 19, p. 454.
146. Lines M. E. "Phys. Rev.", 1965, v. 137, p. A 982.
147. Шапиро В. Г., Ожогин В. И., Гуртовой К. Г. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1972, т. 36, с. 1559.
148. Bizette H. e. a. "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 421.
149. Roth W. Z. "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1963, v. 8, p. 213.
150. Ishikawa Y., Akimoto S. "J. Phys. Soc. Japan", 1958, v. 13, p. 1298.
151. Swoboda T. e. a. "J. Phys. Chem. Sol.", 1958, v. 5, p. 293.
152. Blasse G., Schipper D. "Phys. Lett.", 1963, v. 5, p. 300.
153. Haseda T. e. a. Proc. VIII Intern. Conf. LTP, London, Butterworths, 1963, p. 232.
154. Narath A. "J. Phys. Soc. Japan", 1964, v. 19, p. 2244.
155. Robinson W. K., Friedberg S. A. "Phys. Rev.", 1960, v. 117, p. 402.

156. Forstat H. e. a. "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1960, S. 11, v. 5, p. 59.
157. Ohtsubo A., Kanda E. "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 17, S. B-1, p. 497.
158. Miedema A. R. e. a. "Phys. Lett.", 1965, v. 17, p. 87.
159. Beljers H. G. e. a. "Phys. Lett.", 1964, v. 12, p. 81.
160. Cox D. E., Shirane G., Frazer B. C. "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1459.
161. Trombe M. "J. Physiq.", 1951, v. 12, p. 170.
162. Sparks T. J., Komoto T. "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1033.
163. Adachi K. "J. Phys. Soc. Japan", 1961, v. 16, p. 2187.
164. Bizette H. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1956, v. 243, p. 1295.
165. Shirane G. e. a. "J. Phys. Soc. Japan", 1959, v. 14, p. 1352.
166. Heller G. e. a. "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1033.
167. Holden T. M. e. a. "J. Phys. C", 1971, v. 4, p. 2127.
168. Санина В. А. Диссертация. Институт полупроводников АН СССР. Л., 1970.
169. Rudorff W. e. a. "Z. anorgan. und. allgem. Chem.", 1962, Bd 317, S. 261.
170. Plumier R., Legrand E. "J. Phys. Rad.", 1962, v. 23, p. 474.
171. Burgiel J. S. e. a. "Phys. Rev.", 1961, v. 122, p. 429.
172. Spence R. D. e. a. "J. Chem. Phys.", 1959, v. 31, p. 555.
173. Berger L., Friedberg S. "Phys. Rev.", 1964, v. 136A, p. 158.
174. Tzubokawa I. "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 2109.
175. Ascher E. e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 1404.
176. Joenk R. J., Bozorth R. M. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 1167.
177. Eisenberg W. R., Forstat H. "J. Phys. Soc. Japan", 1964, v. 19, p. 406.
178. Vossoc P. H. "J. Chem. Phys.", 1960, v. 32, p. 1590.
179. Berger L. e. a. "Phys. Rev.", 1963, v. 132, p. 1057.
180. Kobayashi H., Haseda T. "J. Phys. Soc. Japan", 1963, v. 18, p. 541.
181. Frikee E., Van den Handel J. "Physika", 1962, v. 28, p. 269.
182. Figgis B., Martin R. "J. Chem. Soc. (London)", 1956, v. 10, p. 3837.
183. Gilmour A., Pink R. "J. Chem. Soc. (London)", 1953, v. 8, p. 2198.
184. Date M. "J. Phys. Soc. Japan", 1957, v. 12, p. 1168.
185. Kotthaus J. P., Jaccarino V. В кн.: Труды международной конференции по магнетизму. М., «Наука», 1974, т. III, с. 255.
186. Wohlfarth E. P. "Acta Mett.", 1956, v. 4, p. 225.
187. Альшин Б. И., Астров Д. Н. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1963, т. 44, с. 1195.
188. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. Пер. с англ. М., Гостехиздат, 1963, с. 490.
189. Alfieri G. T. e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 1254.
190. Wilkinson M. K. e. a. "Phys. Rev.", 1961, v. 121, p. 74.
191. Levi M. W., Sapp R. C., Culvahouse J. W. Proc. VII Intern. Conf. LTP. Toronto, 1960 (Amsterdam, 1961), p. 168.
192. Busch G. e. a. "Phys. Lett.", 1964, v. 9, p. 7.
193. Mc Guire T. R., Shaffer M. W. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 984.
194. Lee K., Muir H. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 1043.
195. Child H. R. e. a. "Phys. Rev.", 1963, v. 131, p. 922.
196. Sherwood R. C., Williams H. J., Wernick J. H. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 1049.
197. Busch G. e. a. "Phys. Lett.", 1964, v. 11, p. 100.
198. Busch G. e. a. "Phys. Lett.", 1965, v. 15, p. 301.
199. Owen J. "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 138.
200. Henshaw D. G., Brockhouse B. N. "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1957, v. 2, p. 9.
201. Ross J. S., Lam D. J. "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1451.
202. Smith H. G., Bacon G. E. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 979.
203. Busch G. e. a. "Phys. Lett.", 1965, v. 14, p. 262.
204. Sekizawa K. "Phys. Lett.", 1964, v. 11, p. 216.
205. Holmes L., Schieber M. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 968.
206. Mc Guire T. R. e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 981.
207. Smith H. G. e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 1047.
208. Keep B. e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 1120.
209. Юдин В. М., Гаврилишина А. И. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 3435.
210. Wolf W. P. e. a. "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 17, S. B-1, p. 443.
211. Herpin A. e. a. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1964, v. 259, p. 2416.
212. Маковецкий Г. И., Сирота И. Н. «Докл. АН БССР», 1965, т. 9, с. 15.
213. Wassher J. D. Intern. Confer. Semicond. Physics, Paris, 1964, p. 1269.
214. Cable J. W. e. a. "Phys. Rev.", 1962, v. 125, p. 1860.
215. Tsujikawa I., Kanda E. "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 22.
216. Takeda K., Kawasaki K. "J. Phys. Soc. Japan", 1971, v. 31, p. 1026.
217. Matsuura M. e. a. "J. Physiq.", 1971, CI-157.
218. Callagher P. K., McChesney J. B., Buchanan D. N. "J. Chem. Phys.", 1964, v. 41, p. 2429.
219. «Yelon W. B., Cox D. E. "Phys. Rev.", 1972, v. B6, p. 204.
220. Крейнс Н. М., Шальникова Т. А. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1970, т. 58, с. 522.
221. Cashion J. D. "Proc. Roy. Soc. (London)", 1970, v. A 318, p. 473.
222. Miedema A. R., "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. CI-305.
223. Cooke A. H., Martin D. M., Wells M. R. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. CI-488.
224. Madhav Rao L., Satya Murthy N. S. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. CI-617.
225. Петров М. П., Смоленский Г. А. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 2156.
226. Goodenough J. B., e. a. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. CI-622.
227. Bertaut E. F. e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 1038.
228. Elmalen D., Fruchart D., Joubert J. C. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. CI-741.
229. Eibschütz M. e. a. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. CI-759.
230. Cox D. E. e. a. "J. Appl. Phys.", 1970, v. 41, p. 943.
231. Scharenberg W., Will G. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. CI-855.
232. Fruchart D. e. a. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. CI-876.
233. Takayanagi S., Watanabe T. "J. Phys. Soc. Japan", 1970, v. 28, p. 296.
234. Boucher B., Sougi M., Mlle Whuler. A. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. CI-853.
235. Hutchings M. T. e. a. "Phys. Rev.", 1969, v. 188, p. 919.

236. Wolfers P., Bacmann M., Bertaut E. F. "J. Physiq." 1971, v. 32, p. C1-859.
237. Bacmann M. e. a. "J. Appl. Phys.", 1969, v. 40, p. 1131.
238. Skalyo J., Shirane Jr. G., Birgeneau R. J. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-882.
239. Minkiewicz V. J., Cox D. E., Shirane G. "J. Physiq." 1971, v. 32, p. C1-892.
240. Blöte H. W. J., Huiskamp W. J. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-1005.
241. Penney T., Kasuya T. "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1403.
242. Mc Guire T. e. a. "J. Appl. Phys.", 1969, v. 40, p. 1009.
243. Busch G., Stutius W., Vogt O. "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1493.
244. Van Toll M. W., Matsuura M., Poulis N. J. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-943.
245. Nagamiya T., Hiyamizu S. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-972.
246. Brown J. D. e. a. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-974.
247. Ayant Y., Belorizky E., Tcheou F. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-1022.
248. Rossat-Mignod J. e. a. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-1031.
249. Miura S. e. a. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-1124.
250. Sanina V. A. e. a. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-1149.
251. Forstet H., Bailey P. T., Ricks J. R. "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1559.
252. Nereson N., Arnold G. "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1625.
253. Olivera N. F. e. a. "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1783.
254. Pernet M., Elmaleh D., Joubert J. "Solid. State Comm.", 1970, v. 8, p. 1583.
255. Великов Л. В., Рудашевский Е. Г., Селезнев В. Н. "Изв. АН СССР. Сер. физ.", 1972, т. 36, с. 1531.
256. Kuznietz M. "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1470.
257. Kunnman W. e. a. "J. Phys. Chem. Sol.", 1968, v. 29, p. 1359.
258. Beckmann V. e. a. "Phys. St. Sol.", 1968, v. 29, p. 781.
259. Lee K. N. e. a. "Phys. Rev. B", 1970, v. 2, p. 4580.
260. Forstet H. e. a. "Phys. Rev.", 1966, v. 145, p. 406.
261. Gonzalo J. A., Cox D. E., Shirane G. "Phys. Rev.", 1966, v. 147, p. 415.
262. Eisenstein J. C., Hudson R. P., Mangum B. W. "Phys. Rev.", 1965, v. 137, p. A-1886.
263. Shachar G., Makovsky J., Shaked H. "Solid State Comm.", 1971, v. 9, p. 493.
264. Fischer E., Gorodetsky G., Horneich R. M. "Solid State Comm.", 1972, v. 10, p. 1127.
265. Holmes L. M., Ballman A. A., Hecker R. R. "Solid State Comm.", 1972, v. 11, p. 409.
266. Nørlund Christensen A., Oliver G. "Solid State Comm.", 1972, v. 10, p. 609.
267. Bloembergen P., Franse J. J. M. "Solid State Comm." 1972, v. 10, p. 325.
268. Yee J. H., Chau H. H. M. "Phys. Lett.", 1970, v. 32A, p. 441.
269. Adachi K., Sato K., Takeda M. "J. Appl. Phys.", 1968, v. 39, p. 900.
270. Grant R. W. e. a. "J. Appl. Phys.", 1968, v. 39, p. 1122.
271. Wolf W. P., Meissner H., Catanese C. A. "J. Appl. Phys.", 1968, v. 39, p. 1134.
272. Becerra C. C. e. a. "Phys. Lett.", 1972, v. 40 A, p. 203.
273. Ожогин В. И. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1963, т. 45, с. 1687.
274. Tsubokawa I. "J. Phys. Soc. Japan", 1959, v. 14, p. 196.
275. Чечерников В. И. и др. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1968, т. 55, с. 151.
276. Адамьян В. Е., Логинов Г. М. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1966, т. 51, с. 1044.
277. Чечерников В. И. и др. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1967, т. 52, с. 854.
278. Robbins M. e. a. "J. Phys. Chem. Solids", 1969, v. 30, p. 1823.
279. Date M. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-837.
280. Ария С. М., Гроссман Г. «Физика твердого тела» 1960, т. 2, с. 1283.
281. Kendrick, Arrot A., Werner S. A. "J. Appl. Phys.", 1968, v. 39, p. 585.
282. Goodman G. "Phys. Rev. Lett.", 1962, v. 9, p. 305.
283. Paoletti A., Pickart S. J., "J. Chem. Phys.", 1960, v. 32, p. 308.
284. Bosorth R. M. e. a. "Phys. Rev.", 1956, v. 103, p. 572.
285. Stout J. W., Lau H. Y. "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1472.
286. Corliss L. M. e. a. "Phys. Rev.", 1960, v. 117, p. 929.
287. Matsumoto K., Hihara T., Kamigaichi T. "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 17, p. 1209.
288. Show A. I. "Phys. Rev.", 1952, v. 85, p. 365.
289. Cable J. W. e. a. "Phys. Rev.", 1960, v. 118, p. 950.
290. Bosorth R., Kramer V. "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 393.
291. Bizette H., Terrier C. "J. Phys. Rad.", 1962, v. 23, p. 486.
292. Frazer B. C., Brown P. J. "Phys. Rev.", 1962, v. 125, p. 1283.
293. Foner S. "Phys. Rev.", 1963, v. 130, p. 183.

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ

31.1. ПОКАЗАТЕЛИ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Показатель преломления: абсолютный $n_{абс}$ — отношение скорости света в вакууме к фазовой скорости света в данной среде; относительный $n_{отн}$ — отношение скорости света в среде II к скорости света в среде I. Показатель преломления зависит от длины волны света. Принято измерять показатель преломления для определенных спектральных линий. Показателю преломления в этом случае приписывается соответствующий индекс.

Таблица 31.1

Индексы показателей преломления

Показатель преломления	Длина волны, нм	Обозначение линии по Фраунгоферу	Элемент, излучающий линию
n_A	766,5	A	K
n_b	706,5	b	He
n_C	656,3	C	H
n_D	589,3	D	Na
n_d	587,6	d	He
n_e	546,1	e	Hg
n_F	486,1	F	H
n_g	435,8	g	Hg
n_G	434,0	G	H
n_h	404,7	h	Hg

В табл. 31.2—31.20 приведены значения показателя преломления веществ по отношению к воздуху. Показатель преломления среды относительно воздуха n , показатель преломления воздуха $n_{возд}$ и абсолютный показатель преломления $n_{абс}$ связаны формулой

$$n_{абс} = n_{возд} n.$$

Оптические свойства анизотропных сред характеризуются двумя (для одноосных кристаллов) или тремя (для двuosных) показателями преломления.

В одноосных кристаллах n_o и n_e — показатели преломления обыкновенного (n_o) и необыкновенного (n_e) лучей. В таблицах приведены главные значения n_e , соответствующие направлению в кристалле, перпендикулярному к оптической оси.

В двuosных кристаллах оба луча, возникающих вследствие двойного лучепреломления, необыкновенные. Оптическая индикатриса двuosных кристаллов (векторная диаграмма, изображающая угловые зависимости оптических свойств тела) представляют собой трехосный эллипсоид, полуоси которого равны главным показателям преломления кристалла.

В табл. 31.2—31.20 использованы обозначения: $(n_F - n_C)$ — средняя дисперсия; $(n_D - 1)/(n_F - n_C)$ — коэффициент дисперсии; $\frac{n_F - n_D}{n_F - n_C}$; $\frac{n_F - n_e}{n_F - n_C}$;

$\frac{n_G - n_F}{n_F - n_C}$ — относительные (частные) дисперсии; V_C — термооптическая постоянная (средняя для области $t = -60^\circ \div 20^\circ\text{C}$), $V_C = \beta_C / (n_C - 1) - \alpha$, где $\beta = dn/dT$ — приращение показателя преломления при повышении температуры на 1°C ; α — коэффициент линейного расширения; $\Delta\lambda$ — границы поглощения, ограничивающие спектральную область, для которой пропускание образца толщиной 10 мм составляет не менее 50%.

Газы

Показатель преломления сухого воздуха $n_{возд}$ зависит от длины волны света и при давлении $P = 760$ мм рт. ст. и температуре $t = 15^\circ\text{C}$ [1]

$$n_{возд} = 1 + \frac{1}{10^6} \left[64,328 + \frac{29498,1}{146 - 10^6/\lambda_0^2} + \frac{255,40}{41 - 10^6/\lambda_0^2} \right],$$

где λ_0 — длина волны в вакууме, нм.

Для других температур и давлений [1]

$$(n_t; P-1) = (n_{15; 760} - 1) \frac{P [1 + (1,049 - 0,0157t) \cdot 10^{-6} P]}{720,883 (1 + 0,003661t)}.$$

Таблица 31.2

Показатель преломления газов (0°C и 760 мм рт. ст.)

Газ (пар)	Формула	n_D
Азот	N ₂	1,000297
Азота закись	N ₂ O	1,000515
» окись	NO	1,000297
Аммиак	NH ₃	1,000375
Аргон	Ar	1,000284
Ацетилен	C ₂ H ₂	1,000606
Бензол	C ₆ H ₆	1,000788
Бром	Br ₂	1,001125
Вода	H ₂ O	1,000252
Водород	H ₂	1,000139
» бромистый	HBr	1,000570
» иодистый	HI	1,000906
» хлористый	HCl	1,000444
Воздух	—	1,000292
Гелий	He	1,000035
Дейтерий	D ₂	1,000137
Кислород	O ₂	1,000272
Криптон	Kr	1,000427
Ксенон	Xe	1,000702
Метан	CH ₄	1,000441
Метанол (метилловый спирт)	CH ₃ OH	1,000586
Метил фтористый	CH ₃ F	1,000449
» хлористый	CH ₃ Cl	1,000865
Мышьяк	As	1,001552
Неон	Ne	1,000067
n-Пентан	n-C ₅ H ₁₂	1,001701
Ртуть	Hg	1,000933
Селен	Se	1,000895
Сера	S	1,001111
» шестифтористая	SF ₆	1,000783
Сернистый газ	SO ₂	1,000660
Серный ангидрид	SO ₃	1,000737
Сероводород	H ₂ S	1,000619
Сероуглерод	CS ₂	1,001476
Теллур	Te	1,000991
» четыреххлористый	TeCl ₄	1,002600
Углекислота	CO ₂	1,000450
Углерод четыреххлористый	CCl ₄	1,001768
Углерода окись	CO	1,000334
Фосфор	P	1,001212
» треххлористый	PCl ₃	1,001730
Фтор	F ₂	1,000195
Хлор	Cl ₂	1,000768
Хлороформ	CHCl ₃	1,001455
Цинк	Zn	1,002050
Этилен	CH ₂ =CH ₂	1,000696

Таблица 31.3

Показатель преломления воды при 20°C [5]
Для D-линии $\beta = -8 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$

Длина волны, нм	n	Длина волны, нм	n
1256,0	1,3210	508,6	1,3360
678,0	1,3308	486,1	1,3371
656,3	1,3311	480,0	1,3374
643,8	1,3314	404,7	1,3428
589,3	1,3330	303,4	1,3581
546,1	1,3345	214,4	1,4032

Жидкости

Таблица 31.4

Показатель преломления жидкостей при 20°C [5]

Жидкость	n_D	Жидкость	n_D
Анилин	1,586	α -Монобромнафталин	1,660
Бензилбензоат	1,568	Паральдегид	1,405
Бензол	1,501	Парафин жидкий	1,480
Вода	1,333	Серонодород	1,885
Глицерин	1,470	Скипидар	1,470
Масла		Толуол	1,497
гвоздичное	1,532	Углерод четыреххлористый	1,460
кедровое	1,516	Фосфор (раствор в сероуглероде)	1,950
коричное	1,601	Хинолин	1,627
парафиновое	1,440	Хлорбензол	1,525
пропанское	1,460	Этил коричный	1,559
Метилацетат	1,450	Этилсалицилат	1,523
Метилен иодистый	1,737		
Метилсалицилат	1,538		

Оптические стекла

Таблица 31.5

Показатель преломления оптических стекол [2]

Для обозначения марок стекол приняты сокращения:
К — крон; Ф — флинт; БК — баритовый крон; ЛК — легкий крон; ТК — тяжелый крон; БФ — баритовый флинт; ЛФ — легкий флинт; ТФ — тяжелый флинт; ОФ — особый флинт; КФ — крон-флинт

Марка стекла	n_D	$10^5 (n_F - n_C)$	$\frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$	$10^5 V_C$	$\frac{n_F - n_D}{n_F - n_C}$	$\frac{n_F - n_e}{n_F - n_C}$	$\frac{n_D - n_F}{n_F - n_C}$
БК4	1,5302	877	60,5	-3,8	0,704	0,457	0,564
БК6	1,5399	905	59,7	-4,4	0,704	0,457	0,567
БК8	1,5467	871	62,8	0,6	0,702	0,454	0,560
БК9	1,5646	1012	56,8	-1,3	0,705	0,459	0,572
БК10	1,5688	1015	56,0	0,0	0,706	0,459	0,571
БК11	1,5524	872	63,3	-1,1	0,702	0,454	0,559
БК12	1,5606	961	58,3	-3,0	0,705	0,457	0,568
БК13	1,5594	915	61,1	-1,7	0,703	0,456	0,563
БФ1	1,5247	955	54,9	-0,1	0,706	0,459	0,573
БФ4	1,5480	1016	53,9	-2,1	0,707	0,460	0,576
БФ6	1,5696	1152	49,4	-3,2	0,709	0,463	0,584
БФ7	1,5795	1076	53,9	0,0	0,708	0,461	0,576
БФ8	1,5826	1254	46,5	-3,3	0,710	0,464	0,591
БФ11	1,6222	1171	53,1	0,5	0,708	0,461	0,577
БФ12	1,6259	1601	39,1	-4,0	0,714	0,468	0,603
БФ13	1,6395	1325	48,3	0,7	0,710	0,463	0,586
БФ16	1,6709	1419	47,3	-4,5	0,710	0,464	0,587
БФ18	1,5604	1100	50,9	-1,3	0,708	0,462	0,580
БФ19	1,5895	1153	51,1	-1,1	0,708	0,462	0,580
БФ21	1,6140	1534	40,0	0,3	0,713	0,467	0,601
БФ23	1,5493	1048	52,4	-2,4	0,707	0,461	0,579
БФ24	1,6344	1726	36,8	0,5	0,715	0,469	0,607
БФ25	1,6076	1318	46,1	0,7	0,711	0,464	0,589
БФ26	1,6504	1691	38,5	3,5	0,714	0,468	0,604
БФ27	1,6067	1380	44,0	-1,2	0,712	0,466	0,594
БФ28	1,6641	1874	35,4	6,3	0,716	0,470	0,611

Показатели преломления кристаллического и плавного кварца при 18°C [3]

Марка стекла	n_D	$10^5(n_F - n_C)$	$\frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$		$10^5 V_C$	$\frac{n_F - n_D}{n_F - n_C}$		$\frac{n_F - n_e}{n_F - n_C}$		$\frac{n_D - n_F}{n_F - n_C}$	
			$n_D - 1$	$n_F - n_C$		$n_F - n_D$	$n_F - n_C$	$n_F - n_e$	$n_F - n_C$	$n_D - n_F$	$n_F - n_C$
K1	1,4982	765	65,1	—2,0	0,700	0,453	0,553				
K2	1,5004	758	66,0	0,6	0,700	0,452	0,555				
K3	1,5100	805	63,4	—3,3	0,702	0,454	0,560				
K5	1,5110	795	64,3	—1,4	0,701	0,454	0,557				
K8	1,5163	806	64,1	—2,2	0,701	0,454	0,557				
K14	1,5147	849	60,6	1,5	0,703	0,455	0,562				
K15	1,5335	962	55,5	—2,6	0,706	0,459	0,572				
K18	1,5191	860	60,4	0,4	0,703	0,455	0,564				
K19	1,5187	841	61,7	—2,8	0,703	0,455	0,563				
K20	1,5263	875	60,1	0,2	0,704	0,456	0,565				
KФ1	1,5153	946	54,5	0,1	0,705	0,459	0,574				
KФ3	1,5262	1032	51,0	—2,2	0,708	0,461	0,580				
KФ4	1,5181	879	58,9	0,6	0,703	0,456	0,565				
KФ5	1,4996	805	62,1	0,5	0,702	0,455	0,562				
KФ6	1,5005	875	57,2	1,9	0,704	0,458	0,568				
KФ8	1,5332	1026	52,0	—1,7	0,707	0,460	0,579				
ЛК3	1,4874	696	70,0	—10,7	0,699	0,452	0,553				
ЛК4	1,4903	753	65,1	2,8	0,707	0,452	0,553				
ЛК5	1,4781	729	65,6	9,7	0,698	0,451	0,553				
ЛК6	1,4704	704	66,8	—8,6	0,700	0,452	0,553				
ЛФ1	1,5406	1145	47,2	—5,4	0,709	0,462	0,588				
ЛФ5	1,5749	1392	41,3	0,6	0,712	0,466	0,598				
ЛФ7	1,5783	1407	41,1	—0,4	0,712	0,466	0,599				
ЛФ10	1,5480	1195	45,9	—3,0	0,710	0,464	0,592				
ЛФ11	1,5608	1199	46,8	—1,2	0,710	0,463	0,588				
ОФ1	1,5294	1022	51,8	0,4	0,706	0,459	0,574				
ОФ2	1,5538	1140	48,6	—3,0	0,708	0,461	0,582				
ОФ3	1,6123	1389	44,1	—0,3	0,708	0,461	0,583				
ТК1	1,5638	928	60,8	—0,7	0,703	0,456	0,563				
ТК2	1,5724	996	57,5	—1,0	0,705	0,458	0,569				
ТК3	1,5891	962	61,2	0,2	0,702	0,455	0,562				
ТК4	1,6111	1095	55,8	1,7	0,707	0,459	0,572				
ТК7	1,6137	1090	56,3	—2,3	0,705	0,458	0,570				
ТК8	1,6140	1114	55,1	0,2	0,707	0,460	0,572				
ТК9	1,6171	1142	54,0	—1,4	0,707	0,460	0,575				
ТК12	1,5688	904	62,9	—0,9	0,702	0,454	0,559				
ТК13	1,6038	996	60,9	—2,3	0,703	0,456	0,565				
ТК14	1,6130	1012	60,6	—3,0	0,704	0,456	0,564				
ТК16	1,6126	1050	58,3	—3,5	0,704	0,457	0,569				
ТК20	1,6220	1097	56,7	—3,4	0,705	0,459	0,571				
ТК21	1,6568	1285	51,1	—2,7	0,708	0,462	0,580				
ТФ1	1,6475	1912	33,9	—3,8	0,716	0,471	0,613				
ТФ2	1,6725	2087	32,2	0,7	0,717	0,472	0,617				
ТФ4	1,7398	2628	28,2	1,6	0,719	0,475	0,628				
ТФ5	1,7550	2743	27,5	1,6	0,720	0,475	0,630				
ТФ7	1,7280	2570	28,3	—3,5	0,719	0,474	0,627				
ТФ8	1,6893	1285	31,1	0,6	0,717	0,472	0,619				
ТФ10	1,8060	3178	25,4	2,8	0,721	0,477	0,636				
Ф1	1,6128	1659	36,9	0,9	0,714	0,468	0,607				
Ф2	1,6164	1684	36,6	0,0	0,714	0,468	0,608				
Ф4	1,6242	1738	35,9	0,7	0,715	0,469	0,608				
Ф6	1,6031	1590	37,9	—1,1	0,714	0,468	0,604				
Ф7	1,6232	1689	36,9	0,3	0,714	0,468	0,607				
Ф8	1,6248	1757	35,6	—8,4	0,715	0,470	0,610				
Ф13	1,6199	1706	36,3	1,0	0,714	0,469	0,608				

Длина волны, нм	Элемент, излучающий линию	Кварц		
		Кристаллический		Плавный
		o-луч	e-луч	
185,467	Al	1,67578	1,68997	1,57436
193,583	Al	1,65999	1,67343	1,55999
200,06	Au	1,64927	1,66227	—
202,55	Zn	1,64557	1,65842	1,54727
204,448	Au	1,64288	1,65562	—
211,07	Au	1,64342	1,64671	—
214,439	Cd	1,63039	1,64262	1,53386
219,462	Cd	1,62497	1,63698	1,52907
226,503	Cd	1,61818	1,62992	1,52308
231,288	Cd	1,61401	1,62559	1,51941
242,796	Au	1,60525	1,61650	—
250,329	Au	1,60032	1,61139	1,50745
257,304	Cd	1,59622	1,60714	1,50379
263,155	Al	1,59309	1,60389	—
274,867	Cd	1,58752	1,59813	1,49617
291,358	Au	1,58098	1,59136	—
303,412	Sn	1,576955	1,58720	1,48594
312,279	Au	1,57433	1,584485	—
325,253	Cd	1,570915	1,58095	—
340,365	Cd	1,56747	1,577385	1,47867
358,68	Al	1,563915	1,573705	—
396,848	Ca	1,55813	1,56772	1,47061
404,656	Hg	1,557156	1,56671	1,46968
410,174	H	1,556502	1,566031	—
434,047	H	1,553963	1,563405	1,46690
435,834	Hg	1,553790	1,563225	1,46675
467,815	Cd	1,551027	1,560368	1,46435
479,991	Cd	1,550118	1,559428	1,46355
486,133	H	1,549683	1,558979	1,46318
508,582	Cd	1,548229	1,557475	1,46191
518,362	Mg	1,547651	1,556887	—
533,85	Cd	1,546799	1,555996	1,46067
546,072	Hg	1,546174	1,555350	1,46013
579,066	Hg	1,544667	1,553791	—
587,563	He	1,544316	1,553428	—
589,29	Na	1,544246	1,553355	1,45845
627,82	Au	1,542819	1,551880	—
643,847	Cd	1,542288	1,551332	1,45674
656,278	H	1,541899	1,550929	1,45640
667,815	He	1,541553	1,550573	—
670,786	Li	1,541466	1,550483	—
706,520	He	1,540488	1,549472	1,45517
728,135	He	1,539948	1,548913	—
766,494	K	1,539071	1,548005	—
794,763	Rb	1,538478	1,547392	1,45340
844,67	O	1,537525	1,54640	—
1000,00	—	1,53503	1,54381	—
1014,06	Hg	1,53483	1,54360	—
1083,03	He	1,53387	1,54260	—
1200,00	—	1,53232	1,54098	—
1300,00	—	1,53102	1,53962	—
1400,00	—	1,52972	1,53826	—
1529,61	Hg	1,52800	1,53646	—
1600,0	—	1,52703	1,53545	—
1800,0	—	1,52413	1,53242	—
2058,20	He	1,51998	1,52814	—
2500,0	—	1,51156	1,51950	—
3000,0	—	1,49962	1,50700	—

Таблица 31.7

Показатель преломления одноосных кристаллов для D-линии [2]

Вещество	o-луч	e-луч
Берилл (изумруд)	1,581	1,575
Корунд (сапфир, рубин)	1,769	1,760
Турмалин	1,669	1,638

Таблица 31.8

Три главных значения показателя преломления двусных кристаллов для D-линии [2]

Вещество	n_1	n_2	n_3
Арагонит	1,590	1,681	1,686
Барит	1,637	1,631	1,649
Гипс	1,5205	1,5226	1,5296
Калий азотно-кислый	1,335	1,506	1,500
Слюда	1,561	1,590	1,594

Таблица 31.9

Показатель преломления LiF при 20°C [2, 4]
 $n_D = 1,3920$ (20°C); $\beta_D = -12,7 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$;
 $(n_D - 1)/(n_F - n_C) = 99,3$; $\Delta\lambda = 160 \div 6300 \text{ нм}$;
 $\alpha = 4,1 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$; $\rho = 2,6 \text{ г/см}^3$; влагоустойчив

Длина волны, нм	n	Длина волны, нм	n
240,0	1,4220	656,3	1,3909
248,3	1,4194	728,1	1,3898
253,6	1,4179	768,2	1,3893
265,4	1,4150	1083,0	1,3866
280,4	1,4119	1200,0	1,3856
302,2	1,4082	1500,0	1,3832
313,2	1,4067	2000,0	1,3788
366,3	1,4012	2500,0	1,3733
404,7	1,3985	3000,0	1,3666
486,1	1,3948	4000,0	1,3495
546,1	1,3930	5000,0	1,3267
587,6	1,3921	6000,0	1,2975
589,3	1,3920		

Показатель преломления NaF (внλιοлеит) при 20°C [2]

$$n_D = 1,3255, \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 85,2$$

Длина волны, нм	n	Длина волны, нм	n
240,0	1,3579	486,1	1,3282
248,3	1,3550	546,1	1,3264
253,6	1,3533	587,6	1,3255
265,4	1,3500	589,3	1,3255
280,4	1,3465	656,3	1,3244
302,2	1,3423	728,1	1,3235
313,2	1,3406	768,2	1,3232
366,3	1,3348	1083,0	1,3213
404,7	1,3319		

Таблица 31.11

Показатель преломления CaF₂ (флюорит) при 18°C [4, 5]

$$n_D = 1,4338; \beta_D = -1,04 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}; \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 95,3; \Delta\lambda = 170 - 9000 \text{ нм}; \alpha = 2 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}; \rho = 3,2 \text{ г/см}^3, \text{ влагоустойчив}$$

Длина волны, нм	n	Длина волны, нм	n
185,2	1,5099	670,8	1,4323
214,4	1,4846	1256,0	1,4275
303,4	1,4534	1500,0	1,4263
404,7	1,4415	2000,0	1,4239
480,0	1,4369	2500,0	1,4211
486,1	1,4371	3000,0	1,4179
508,6	1,4362	4000,0	1,4097
546,1	1,4350	5000,0	1,3990
589,3	1,4339	6000,0	1,3856
643,8	1,4327	8000,0	1,3499
656,3	1,4325		

Таблица 31.12

Показатель преломления BaF₂ при 20°C [4]

$$n_D = 1,4775; \beta_D = -1,52 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}; \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 81,4; \Delta\lambda = 230 - 12000 \text{ нм}; \alpha = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}; \rho = 4,8 \text{ г/см}^3, \text{ влагоустойчив}$$

Длина волны, нм	n	Длина волны, нм	n
1000	1,4686	4000	1,4570
1200	1,4675	5000	1,4511
1500	1,4663	6000	1,4441
2000	1,4647	8000	1,4259
2500	1,4630	10000	1,4014
3000	1,4612		

Таблица 31.13

Показатель преломления NaCl при 18°C [4, 5]
 $n_D = 1,5442$; $\beta_D = -3,6 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$;
 $\frac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 42,7$; $\Delta\lambda = 200 - 17\,000 \text{ нм}$;
 $\alpha = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$; $\rho = 2,2 \text{ г/см}^3$, влагоустойчив

Длина волны, нм	n	Длина волны, нм	n
185,2	1,8933	1 200	1,5302
214,4	1,7322	1 500	1,5284
303,4	1,6085	2 000	1,5268
404,7	1,5665	2 500	1,5255
480,0	1,5541	3 000	1,5244
486,1	1,5534	4 000	1,5220
508,6	1,5509	5 000	1,5190
546,1	1,5475	6 000	1,5155
589,3	1,5443	8 000	1,5066
643,8	1,5412	10 000	1,4949
656,3	1,5407	12 000	1,4801
670,8	1,5400	15 000	1,4515
1000	1,5322		

Таблица 31.14

Показатель преломления KCl (сильвин) при 18°C [4, 5]
 $n_D = 1,4902$; $\beta_D = -3,3 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$;
 $\frac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 43,9$; $\Delta\lambda = 200 - 21\,000 \text{ нм}$;
 $\alpha = 3,7 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$; $\rho = 2,0 \text{ г/см}^3$, влагоустойчив

Длина волны, нм	n	Длина волны, нм	n
185,2	1,8270	1 200	1,4779
214,4	1,6618	1 500	1,4769
303,4	1,5440	2 000	1,4754
404,7	1,5097	2 500	1,4745
480,0	1,4990	3 000	1,4736
486,1	1,4983	4 000	1,4721
508,6	1,4961	5 000	1,4704
546,1	1,4931	6 000	1,4684
589,3	1,4904	8 000	1,4633
643,8	1,4877	10 000	1,4570
656,3	1,4872	12 000	1,4480
670,8	1,4866	15 000	1,4320
1000	1,4799	20 000	1,3938

Таблица 31.15

Показатель преломления KBr при 20°C [4]

$n_D = 1,5600$; $\beta_D = -4,0 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$;

$\frac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 33,5$; $\Delta\lambda = 210 - 28\,000 \text{ нм}$;

$\alpha = 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$; $\rho = 2,8 \text{ г/см}^3$, влагоустойчив

Длина волны, нм	n	Длина волны, нм	n
240,0	1,7576	1 000	1,5445
248,3	1,7330	1 200	1,5421
253,6	1,7198	1 500	1,5399
265,4	1,6950	2 000	1,5383
280,4	1,6713	2 500	1,5374
302,2	1,6460	3 000	1,5368
313,2	1,6361	4 000	1,5357
366,3	1,6039	5 000	1,5345
404,7	1,5899	6 000	1,5332
486,1	1,5719	8 000	1,5302
546,1	1,5641	10 000	1,5264
587,6	1,5601	12 000	1,5217
589,3	1,5600	15 000	1,5129
656,3	1,5552	20 000	1,4926
728,1	1,5516	25 000	1,4642
768,2	1,5501		

Таблица 31.16

Показатель преломления КРС-5 (состав: 42% TiBr, 58% TiI) при 20°C [4]

$n_D = 2,6150$; $\beta_D = -2,5 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$;

$\Delta\lambda = 500 - 36\,000 \text{ нм}$; $\alpha = 7,0 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$;

$\rho = 7,4 \text{ г/см}^3$, влагоустойчив

Длина волны, нм	n	Длина волны, нм	n
1000	2,4474	8 000	2,3757
1200	2,4258	10 000	2,3719
1500	2,4089	12 000	2,3673
2000	2,3962	15 000	2,3592
2500	2,3903	20 000	2,3417
3000	2,3869	25 000	2,3186
4000	2,3841	30 000	2,2896
5000	2,3810	40 000	2,2113
6000	2,3791		

Таблица 31.17

Показатель преломления CsI при 20°C [4]

$n_D = 1,7874$; $\beta_D = -9,9 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$;

$\frac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 24,0$; $\Delta\lambda = 290 - 52\,000 \text{ нм}$;

$\alpha = 4,9 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$; $\rho = 4,5 \text{ г/см}^3$, влагоустойчив

Длина волны, нм	n	Длина волны, нм	n
1000	1,7576	8 000	1,7409
1200	1,7530	10 000	1,7395
1500	1,7494	12 000	1,7378
2000	1,7465	15 000	1,7347
2500	1,7451	20 000	1,7280
3000	1,7444	25 000	1,7192
4000	1,7434	30 000	1,7077
5000	1,7427	40 000	1,6785
6000	1,7421	50 000	1,6369

Таблица 31.18

Показатель преломления полевого (исландского) шпата [5]

Длина волны, нм	о-Луч	е-Луч	Длина волны, нм	о-Луч	е-Луч
214,4	1,8459	1,5600	589,3	1,6584	1,4864
303,4	1,7196	1,5136	643,8	1,6550	1,4847
404,7	1,6813	1,4969	656,3	1,6544	1,4846
480,0	1,6686	1,4911	670,8	1,6537	1,4843
486,1	1,6678	1,4907	1256	1,6388	1,4782
508,6	1,6653	1,4895	2172	1,6210	1,4746
546,1	1,6616	1,4879			

Таблица 31.19

Показатель преломления КГ при 20°C [2]

$$n_D = 1,67; \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 23,2$$

Длина волны, нм	n	Длина волны, нм	n
248,3	2,0548	486,1	1,6866
253,6	2,0116	546,1	1,6731
265,4	1,9424	587,6	1,6665
280,4	1,8837	589,3	1,6664
302,2	1,8277	656,3	1,6581
313,2	1,8071	728,1	1,6520
366,3	1,7442	768,2	1,6494
404,7	1,7184	1083	1,6381

Различные материалы

Таблица 31.20

Оптические постоянные металлов и полупроводников [6]
 n — показатель преломления; k — показатель поглощения;
 $n^* = n(1 + ik)$. Прохождение света через проводящие
 вещества определяется соотношением
 $I = I_0 \exp(-4\pi ndk/\lambda)$, где d — толщина поглощающего
 слоя; n и k — оптические постоянные
 для длины волны λ

Вещество	$\lambda=500 \text{ нм}$		$\lambda=5000 \text{ нм}$	
	n	k	n	k
Ag	0,11	26,73	2,4	14,17
Al	0,50	9,18	6,7	5,61
Au	0,50	4,08	3,3	10,67
Co	1,56	2,20	4,3	3,40
Cu	1,06	2,55	3,1	10,58
Fe	1,46	2,17	4,20	2,98
In	—	—	9,8	3,29
Mo	3,15	1,18	4,25	5,62
Na*	0,05	52,2	—	—
Nb	2,13	1,44	8,0	3,46
Ni	1,54	2,01	4,95	3,74
Pb	1,70	1,94	9,0	2,75
Pt	1,76	2,04	7,6	2,66
Si*	4,24	0,114	—	—
Sn	0,78	4,90	8,5	3,35
Ti	2,10	1,34	3,4	2,76
V	2,65	2,56	6,6	2,65
W	3,31	0,89	3,48	6,09
Zn	—	—	3,8	6,89

* Оптические характеристики относятся к $\lambda=589,3 \text{ нм}$.

31.2. КОЭФФИЦИЕНТЫ ОТРАЖЕНИЯ. ПРОСВЕТЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Коэффициентом отражения называют отношение потока излучения, отраженного данным телом, к падающему потоку.

Таблица 31.21

Коэффициент отражения света (при нормальном падении) от полированных металлических поверхностей [5], %

Длина волны, нм	Магний (Al—69%, Mg—31%)	Медь	Олово	Платина	Родий	Сталь (Fe—99%, C—1%)	Хром	Цинк
188	53	—	—	35	—	22,0	33	—
200	56	—	—	38	—	27,0	36	—
251	67	25,9	—	33,8	—	38,0	32	—
288	—	24,3	—	38,8	—	—	—	—
305	69	25,3	—	39,8	—	44,0	37	—
316	—	—	—	—	—	—	—	—
326	77	24,9	—	41,4	—	—	—	—
357	81	27,3	—	43,4	—	50,0	41	—
385	—	28,6	—	45,4	—	—	—	—
420	83	32,7	—	51,8	—	—	—	—
450	—	37,0	—	54,7	—	55,0	—	54
500	—	43,7	—	58,4	76,0	56,0	55	55
550	83	47,7	—	61,1	—	56,0	—	56
600	—	71,8	—	64,2	—	57,3	—	57,5
650	83	80,0	—	66,5	—	58,0	—	—
700	—	82,4	—	69,0	—	58,0	56	61
800	—	88,6	—	70,3	81,0	—	—	61,5
1 000	84	90,1	54,0	72,9	84,0	63	57	69,0
2 000	—	95,5	60,0	80,6	91,0	77	63	94,0
3 000	—	97,1	68,6	88,8	92,0	83	70	95,5
4 000	89	97,3	71,7	91,5	92,5	88	76	—
5 000	—	97,9	76,7	—	93,0	—	81	97,2
7 000	—	98,3	86,3	—	93,5	—	—	97,2
9 000	—	98,4	87,0	95,4	94,5	93	92	98,1
11 000	—	98,4	—	95,6	—	—	93	—
12 000	—	—	86,9	—	—	—	—	98,3
14 000	92	97,9	—	96,4	—	95	—	—

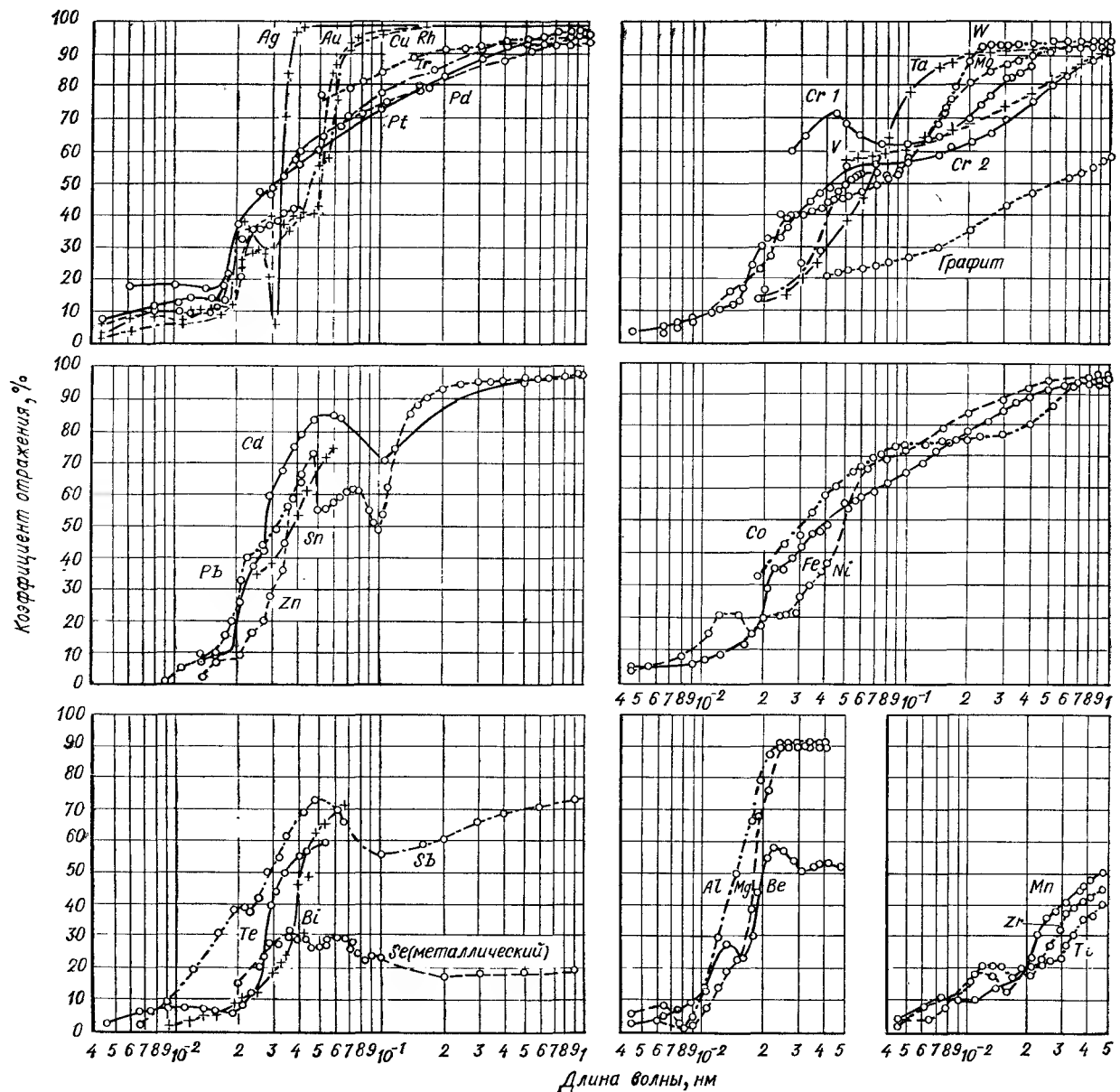


Рис. 31.1. Коэффициент отражения света для металлов и графита [7].

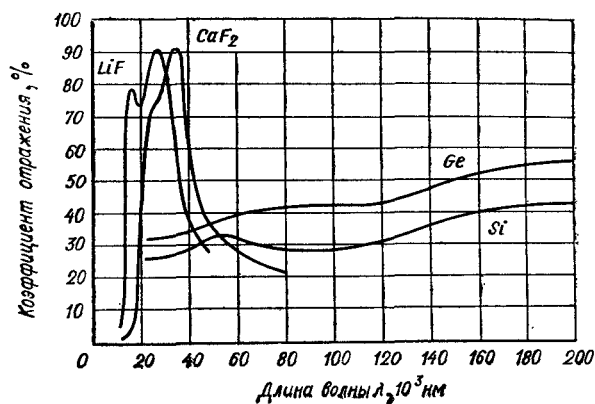


Рис. 31.2. Коэффициент отражения для LiF; CaF₂; Ge и Si [8].

Таблица 31.22

Коэффициент отражения света от тонких стеклянных полированных пластинок [5], %

Учтены обе поверхности и внутренние отражения. Расчитано для желтых лучей с показателем преломления n_D

Угол падения, град	n_D				
	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70
0	7,8	8,8	10,2	11,3	12,6
10	7,8	8,8	10,2	11,3	12,6
20	8,0	8,9	10,3	11,4	12,7
30	8,0	9,1	10,4	11,4	12,8
40	8,6	9,8	11,1	12,2	13,4
50	10,4	11,6	12,7	13,9	15,1
60	15,2	16,3	17,4	18,4	19,4
70	27,3	28,1	28,9	29,6	30,2

Отражение света значительно уменьшается, если отражающую поверхность покрыть «неотражающей» пленкой; в этом случае поверхность становится «просветленной». При нормальном падении света оптическая толщина пленки должна равняться четверти его длины волны, а показатель преломления вещества пленки — корню квадратному из показателя преломления стекла, на которое она наносится. Эффективность пленки зависит от того, насколько выполняются данные условия; на практике для одной пленки отражение света обычно уменьшается приблизительно на 1%. Наиболее часто для просветления употребляют фтористый магний ($n_D = 1,390$). Можно также увеличить отражение, нанося на поверхность стекла пленку толщиной, равной одной четверти длины волны, из материала с большим коэффициентом отражения, например из сернистого цинка или двуокиси титана. Такой прием обычно ис-

пользуют для расщепления луча, так как поглощение света в пленке очень мало по сравнению с поглощением полупрозрачными слоями металла.

Таблица 31.23

Показатель преломления материалов, используемых для отражающих покрытий

Материал	Показатель преломления	Области длин волн, в которых используется материал, нм
Al ₂ O ₃	1,69	200—7000
Ge	4,0	1300—35 000
GeO ₂	2,30	400—5000
MgF ₂	1,38	200—5000
NaAlF ₂	1,35	200—10 000
Si	3,40	900—8000
SiO	1,85	800—7000
SiO ₂	1,45	200—8000
Si ₃ O ₃	1,55	300—8000
TiO ₂	2,30	400—12 000
ZnS	2,30	140—15 000
ZrO ₂	2,1	250—7000

31.3. ОБЛАСТИ ПРОЗРАЧНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОГЛОЩЕНИЯ

Коэффициент пропускания есть отношение потока излучения, прошедшего через данное тело, к падающему потоку излучения.

Коэффициент поглощения есть отношение потока излучения, поглощенного телом, к падающему на него потоку.

В области прозрачности проходит не менее 50% светового потока, а область непрозрачности характеризуется поглощением светового потока до 90% и более.

Таблица 31.24

Пропускание газовых фильтров в вакуумном ультрафиолете [9]

Области относительной прозрачности и относительной непрозрачности газов даны для температуры газа 0°C и давления 760 мм рт. ст.

Газ	Толщина фильтра, см	Область относительной прозрачности, нм	Область относительной непрозрачности, нм
CCl ₄	0,0025	116—120; >155	122—133; <115
CCl ₂ F ₂	0,0025	120,0—123,0; >137,5	123,5—132,5; <119,5
CH ₄	0,025	140	<137,5
C ₂ H ₄	0,025	185	<175
C ₃ H ₈	0,1	160	<157,5
CH ₃ —CH	0,1	166	<164
CH ₃ Br	0,05	152,5—157,5; >180	161—177,5; <152
CH ₃ Cl	0,1	142,5—146; >185	147,5—161; <142
CO ₂	0,5	117,5—125; >165	130—155; <115
Cl ₂	0,1	Около 12 полос прозрачности между 117 и 131. Одна полоса прозрачна для лаймановской линии водорода; >145	
CS ₂	0,5	Около 10 полос прозрачности между 153 и 178; >220.	180—210; <152
H ₂ S	0,1	160—170; >230	180—220; <157,5
NH ₃	0,1	Около 10 полос прозрачности между 145 и 170; >215	170—205; <142,5
N ₂ O	0,025	120—122; >153	122—135; <119
SO ₂	0,1	162,5—175; >225	180—215; <159

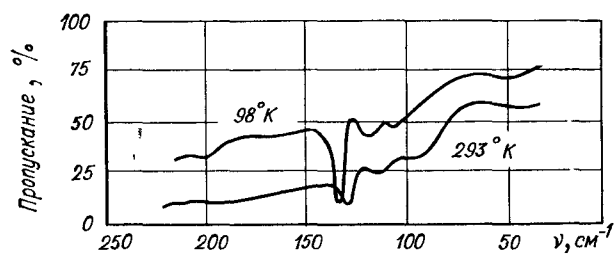


Рис. 31.3. Пропускание кристаллического кварца толщиной 5 мм в инфракрасной области [10]

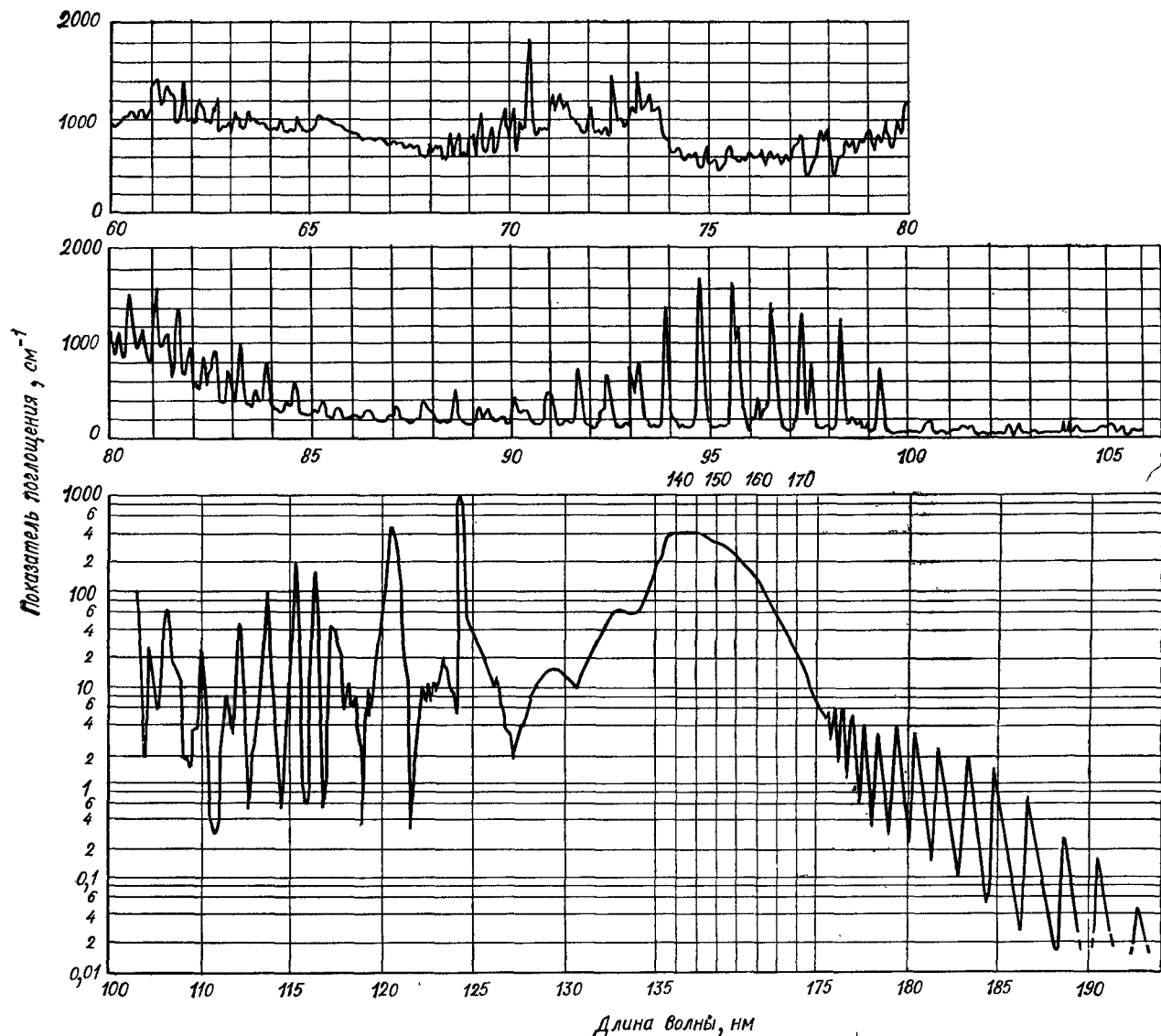


Рис.31.4. Коэффициент поглощения вакуумного ультрафиолета молекулярным кислородом в области 60–190 нм [11, 12].

Области прозрачности некоторых веществ

Числа в скобках означают коэффициент пропускания в процентах для соответствующих значений длин волн и толщины слоя материала

Вещество	Толщина, мм	Граница, нм		Литература
		коротковолновая	длинноволновая	
Бромистый калий KBr	10	210 (50)	28 000 (50)	[4]
» цезий CsBr	5	—	40 800 (50)	[8]
Вода дистиллированная	20	188 (50)	—	[13]
» »	40	192 (50)	—	[13]
» »	80	202 (50)	—	[13]
Викор	2	223 (50)	—	[13]
Германий	2	1800 (20)	15 000 (40)	[8]
Гипс	1	161	—	[9]
Двуокись титана (рутил)	6	420 (40)	6 000 (10)	[14]
Иодистый калий KI	0,83	250	42 000 (50)	[5, 8]
» цезий CsI	10	290 (50)	52 000 (50)	[8]
Исландский шпат	—	200	2 000	[5]
Канадский бальзам	0,1	330	—	[5]
Кварц кристаллический	5	185 (50)	—	[13]
» »	10	193—200(50)	3 600 (50)	[4, 13]
» плавленый	10	194 (50)	—	[13]
Корунд Al ₂ O ₃	1	145 (30)	6 000 (50)	[8, 13]
Кремний кристаллический	0,5	1500 (10)	20 000 (45)	[8]
КРС-5	10	500	36 000 (50)	[4]
КРС-6	—	—	30 000 (45)	[8]
Оксид магния-алюминия синтетическая MgO·3Al ₂ O ₃	—	200	6 000	[5]
Оконное стекло	1	316 (50)	—	[13]
» »	3	330 (50)	—	[13]
Полиметилметакрилат	2,5	322 (50)	—	[13]
» »	5	338 (50)	—	[13]
» »	10	350 (50)	—	[13]
Стекло оптическое БК10	10	330 (50)	2 600 (50)	[4]
» » К 8	10	320 (50)	2 600 (50)	[4]
» » ТК 16	10	350 (50)	2 600 (50)	[4]
» » ТФ 1	10	360 (50)	2 700 (50)	[4]
» » ТФ 5	10	380 (50)	2 700 (50)	[4]
» » Ф 1	10	340 (50)	2 700 (50)	[4]
Слюда	0,01	280	—	[5]
Тефлон	0,006	168	—	[9]
Тефлон (CF ₂ —CF ₂) _n	1,81	100 000 (65)	> 600 000(90)	[8]
Титанат стронция SrTiO ₃	1	—	7 000 (12)	[8]
Топаз	1	153,7	—	[9]
Флюорит CaF ₂	5	135 (50)	—	[13]
» »	10	157—170(50)	9 000 (50)	[4, 13]
Фтористый барий BaF ₂	10	230 (50)	12 000 (50)	[4]
» кадмий CdF ₂	5	180 (20)	10 000 (60)	[8]
» литий LiF	5	107 (50)	—	[13]
» »	10	142—160(50)	6 300 (50)	[4, 13]
» натрий NaF (виллиолент)	1	200	16 000 (10)	[8]
Хлористый калий KCl	10	200 (50)	21 000 (50)	[4]
» натрий NaCl	10	200 (50)	17 000 (50)	[4]
» серебро AgCl	5	—	25 000 (35)	[8]

31.4. ИЗЛУЧЕНИЕ

Излучение абсолютно черного тела

Постоянная Стефана—Больцмана

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = \frac{\pi^4 c_1}{15c_2^4} = (5,6698 \pm 0,0011) \times \\ \times 10^{-5} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{град}^{-4}.$$

Энергетическая светимость абсолютно черного тела F равна полному потоку излучения (в сторону внешней нормали) с единицы поверхности при абсолютной температуре T за единицу времени:

$$F = \sigma T^4.$$

Интенсивность излучения абсолютно черного тела

$$B = (\sigma/\pi) T^4 = 1,8048 \cdot 10^{-5} T^4 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1} \times \\ \times \text{град}^{-4}.$$

Плотность излучения внутри полости при температуре T

$$u = (4\sigma/c) T^4 = 7,565 \cdot 10^{-16} T^4 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-3} \cdot \text{град}^{-4}.$$

В среде с показателем преломления n

$$B = n^2 (\sigma/\pi) T^4, \quad u = n^3 (4\sigma/c) T^4.$$

Такие же поправочные множители вводятся в формулу Планка; n есть функция частоты или длины волны: n_ν , n_λ . Постоянная фотонного потока равна

$$p = 15,10611c/c_2^3 = 1,5210 \cdot 10^{11} \text{ фотон} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{град}^{-3}.$$

Фотонный поток с единицы абсолютно черной поверхности

$$N = pT^3.$$

Поляризация. Излучение абсолютно черного тела неполяризовано, однако интенсивность линейно поляризованного излучения в выбранном направлении составляет половину значения, вычисленного по приведенным выше формулам.

Функция Планка (отнесенная к единичному интервалу длин волн)

$$(c/4) u_\lambda = \pi B_\lambda = F_\lambda = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} / (e^{-hc/k\lambda T} - 1) = \\ = c_1 \lambda^{-5} / (e^{c_2/\lambda T} - 1);$$

$$c_1 = 2\pi hc^2 = (3,7403 \pm 0,0002) \cdot 10^{-5} \text{ эрг} \cdot \text{см}^2 / \text{сек};$$

$$c_2 = hc/k = (1,43868 \pm 0,00001) \text{ см} \cdot \text{град};$$

$$c'_2 = c_2 \lg e = 0,62481 \text{ см} \cdot \text{град},$$

где u_λ , B_λ и F_λ — соответственно плотность излучения, интенсивность и энергетическая светимость в единичном интервале длин волн.

Функция Планка (отнесенная к единичному интервалу частот)

$$(c/4) u_\nu = \pi B_\nu = F_\nu = 2\pi h \nu^3 c^{-2} / (e^{-h\nu/kT} - 1).$$

Закон распределения фотонов

$$N_\lambda = 2\pi c \lambda^{-4} / (e^{c_2/\lambda T} - 1);$$

$$N_\nu = 2\pi c^{-2} \nu^2 / (e^{h\nu/kT} - 1)$$

[N_λ и N_ν — количество фотонов, испущенных во всех направлениях площадью 1 см^2 за 1 сек , в единичном интервале длин волн (частот)].

Закон Вина. Длина волны $\lambda_{\text{макс}}$ соответствует максимумам функций F_λ или B_λ :

$$T\lambda_{\text{макс}} = 0,2014052c_2 = (0,28975 \pm 0,00003) \text{ см} \cdot \text{град};$$

$\lambda_{\text{макс}}$ — длина волны, соответствующая максимуму фотонного излучения

$$T\lambda_{\text{макс}} = 0,2550571c_2 = (0,36694 \pm 0,00003) \text{ см} \cdot \text{град};$$

$\nu_{\text{макс}}$ — частота, соответствующая максимумам функций F_ν или B_ν :

$$Tc/\nu_{\text{макс}} = 0,3544290c_2 = 0,50990 \pm 0,00004 \text{ см} \cdot \text{град}.$$

Таблица функции Планка дает:

$$F_{0-\lambda} = \int_0^\lambda F_\lambda d\lambda \text{ в долях } F_{0-\infty} \text{ (обозначенного ранее } F); \\ F_\lambda \quad \quad \quad \gg \quad \quad \quad F_{\lambda_{\text{макс}}}; \\ N_{0-\lambda} = \int_0^\lambda N_\lambda d\lambda \gg \quad \quad \quad N_{0-\infty} \text{ (обозначенного ранее } N); \\ N_\lambda \quad \quad \quad \gg \quad \quad \quad N_{\lambda_{\text{макс}}}; \\ F_\nu \quad \quad \quad \gg \quad \quad \quad F_{\nu_{\text{макс}}}.$$

Приближенные выражения для больших и малых длин волн даются как функции $x = c_2/\lambda T = h\nu/kT$.

Абсолютные значения можно получить, используя следующие данные:

$$F_{0-\infty} = 6,493939c_1 (T/c_2)^4 = \\ = 5,6698 \cdot 10^{-5} T^4 \text{ эрг} / (\text{см}^2 \cdot \text{сек} \cdot \text{град}^4); \\ F_{\lambda_{\text{макс}}} = 21,20144c_1 (T/c_2)^5 = \\ = 1,287 \cdot 10^{-4} T^5 \text{ эрг} / (\text{см}^3 \cdot \text{сек} \cdot \text{град}^5).$$

Для λ в микронах и $T = 10\,000^\circ\text{K}$

$$F_{\lambda_{\text{макс}}} = 1,287 \cdot 10^{12} \text{ эрг} / (\text{см}^2 \cdot \text{сек} \cdot \text{мкм}) \\ N_{0-\infty} = 15,10611c (T/c_2)^3 = \\ = 1,5210 \cdot 10^{11} T^3 \text{ фотон} / (\text{см}^2 \cdot \text{сек} \cdot \text{град}^3); \\ N_{\lambda_{\text{макс}}} = 30,03263c (T/c_2)^4 = \\ = 2,1018 \cdot 10^{11} T^4 \text{ фотон} / (\text{см}^3 \cdot \text{сек} \cdot \text{град}^4); \\ F_{\nu_{\text{макс}}} = 1,421436 (c_1/c) (T/c_2)^3 = \\ = 5,956 \cdot 10^{-16} T^3 \text{ эрг} / (\text{см}^2 \cdot \text{град}^3).$$

В единицах волнового числа при $T = 10\,000^\circ\text{K}$

$$F_{\nu_{\text{макс}}} = 1,7856 \cdot 10^7 \text{ эрг} / (\text{см} \cdot \text{сек}).$$

Таблица значений функций Планка [1]

$\lambda T, \text{ см} \cdot \text{град}$	$x = c_2/\lambda T$	$\frac{F_{0-\lambda}}{F_{0-\infty}}$	$\frac{F_\lambda}{F_{\lambda_{\text{макс}}}}$	$\frac{N_{0-\lambda}}{N_{0-\infty}}$	$\frac{N_\lambda}{N_{\lambda_{\text{макс}}}}$	$\frac{F_\nu}{F_{\nu_{\text{макс}}}}$
	Большие x	$x^3 e^{-x}$	$x^5 e^{-x}$	$x^2 e^{-x}$	$x^4 e^{-x}$	$x^3 e^{-x}$
		6,4939	21,201	2,404	4,780	1,4214
0,00	↑	↑	↑	↑	↑	↑
0,01	143,85	0,05616	0,05398	0,05829	0,05430	0,05670
0,02	71,925	0,02635	0,02352	0,02712	0,02433	0,02615
0,03	47,950	0,01627	0,01318	0,01714	0,01417	0,01512
0,04	35,962	0,01119	0,00683	0,01213	0,01084	0,01179
0,05	28,770	0,008130	0,00297	0,009118	0,007458	0,008536
0,06	23,975	0,007932	0,00145	0,007100	0,00267	0,00375
0,07	20,550	0,006186	0,00206	0,00230	0,00444	0,00726
0,08	17,981	0,004165	0,00138	0,00223	0,00339	0,00635
0,09	15,983	0,004872	0,00563	0,00138	0,00156	0,00329
0,10	14,385	0,00321	0,01644	0,00559	0,00507	0,00118
0,12	11,988	0,00214	0,07264	0,00439	0,02687	0,00754
0,14	10,275	0,00780	0,18627	0,00184	0,08041	0,02631
0,16	8,9906	0,01974	0,34518	0,00522	0,17031	0,06369
0,18	7,9917	0,03938	0,52026	0,01151	0,28877	0,12158
0,20	7,1925	0,06679	0,68344	0,02132	0,42144	0,19659
0,25	5,7540	0,16145	0,94612	0,06155	0,72936	0,42622
0,30	4,7950	0,27336	0,99712	0,11937	0,92241	0,64687
0,35	4,1100	0,38306	0,92271	0,18624	0,99574	0,81474
0,40	3,5962	0,48102	0,80010	0,25511	0,98674	0,92272
0,45	3,1967	0,56444	0,67136	0,32158	0,93161	0,97996
0,50	2,8770	0,63386	0,55467	0,38337	0,85519	0,99952
0,60	2,3975	0,73789	0,37378	0,49020	0,69155	0,96993
0,70	2,0550	0,80812	0,25394	0,57552	0,54815	0,89689
0,80	1,7981	0,85631	0,17598	0,64306	0,43408	0,81177
0,90	1,5983	0,89004	0,12471	0,69669	0,34613	0,72820
1,00	1,4385	0,91418	0,09037	0,73968	0,27870	0,65150
1,20	1,1988	0,94506	0,05040	0,80285	0,18652	0,52330
1,40	1,0275	0,96286	0,03010	0,84605	0,12997	0,42536
1,60	0,8991	0,97377	0,01902	0,87656	0,09379	0,35087
1,80	0,7992	0,98081	0,01257	0,89895	0,06974	0,29353
2,0	0,7192	0,98556	0,00862	0,91585	0,05318	0,24859
3,0	0,4795	0,99524	0,00194	0,95945	0,01798	0,12606
4,0	0,3596	0,99790	0,00655	0,97625	0,00808	0,07560
5,0	0,2877	0,99890	0,00279	0,98452	0,00430	0,05025
10	0,1438	0,99848	0,00188	0,99592	0,00579	0,01354
20	0,0719	0,99801	0,00122	0,99893	0,00751	0,00351
50	0,0288	0,99878	0,00318	0,093828	0,00491	0,00574
100	0,0144	0,99848	0,00200	0,091570	0,00618	0,00145
	↓	↓	↓	↓	↓	↓
	Малые x	$1 - 0,05134 x^3$	$0,04717 x^4$	$1 - 0,2080 x^2$	$0,2092 x^3$	$0,7035 x^2$

Тепловое излучение тел

Излучение поверхности тел характеризуют спектральной степенью черноты ϵ_ν, T и интегральной степенью черноты ϵ_T . Величина ϵ_ν, T равна отношению интенсивностей излучения реального тела и абсолютно черного тела при фиксированных значениях λ и T . Интегральная

степень черноты определяется как отношение полной интенсивности излучения реального тела к полной интенсивности излучения абсолютно черного тела, взятых при одной и той же температуре T . Для металлов значения ϵ_T невелики (0,1—0,3) и сильно зависят от качества поверхности металла. У грязных и неполированных поверхностей ϵ_T значительно выше, чем у очищенных и полированных. Для угля и окислов металлов значения

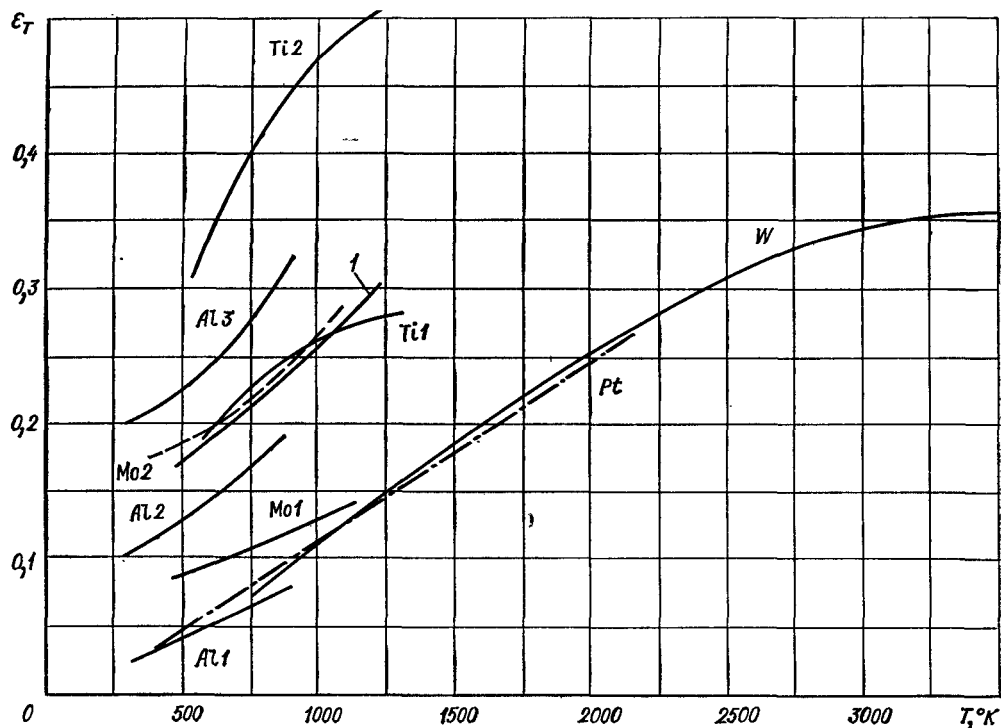


Рис. 31.5. Интегральная степень черноты ϵ_T для некоторых металлов [15, 16]:

1 — нержавеющая сталь марки 1X18H9T [16] титан [16]; Ti1 — полированный очищенный, Ti2 — неполированный неочищенный; молибден: Mo1 — полированный спеченный, Mo2 — неполированный литой; алюминий: Al1 — полированный очищенный, Al2 — слегка окисленный, Al3 — сильно окисленный.

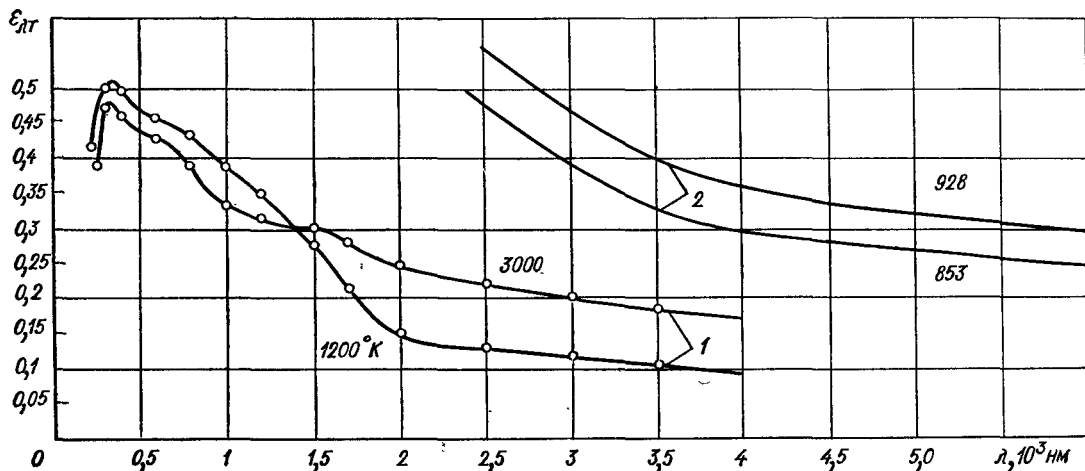


Рис. 31.6. Спектральная степень черноты $\epsilon_{\lambda T}$ [15—17]:

1 — вольфрам; 2 — нержавеющая сталь марки 1X18H9T.
Температура поверхности указана на кривых.

ϵ_T доходят до 0,9, у черненной платины ϵ_T — до 0,93—0,97. Некоторые экспериментальные зависимости $\epsilon_{\lambda T}$ и ϵ_T от длины волны и температуры приведены на рис. 31.3 и 31.4 и в табл. 31.27. Если отсутствуют специальные указания в подписях к рисункам, данные получены для излучения в вакууме чистых, механически полированных поверхностей металлов.

Радиационной температурой $T_{\text{рад}}$ тела называется такая температура черного тела, при которой совпадают величины их полного излучения. Истинная температура излучающего тела T связана с $T_{\text{рад}}$ [18]:

$$T = T_{\text{рад}} / \sqrt[4]{\epsilon_T}.$$

Интегральная степень черноты некоторых тел [18]

Вещество	$T, ^\circ\text{K}$	ϵ_T	Вещество	$T, ^\circ\text{K}$	ϵ_T
Железо	1500	0,11	Оксид никеля	1500	0,85
Медь расплавленная	1400	0,15	Платина	1500	0,15
Никель	1500	0,06	Серебро	1300	0,04
Оксид железа	1500	0,89	Тантал	2300	0,25
» меди	1400	0,54	Уголь	1500	0,52

Цветовая температура. Если распределение энергии на некотором участке спектра реального тела может быть отождествлено с распределением энергии абсолютно черного тела, имеющего температуру $T_{\text{цв}}$, то излучающее тело имеет такой же «цвет», как и черное тело температуры $T_{\text{цв}}$, а $T_{\text{цв}}$ называют цветовой температурой тела [13]. Для тел, характер излучения которых сильно отличается от излучения черного тела, понятие цветовой температуры теряет смысл.

Яркость некоторых источников света

Таблица 31.28

Яркость и цветовая температура $T_{\text{цв}}$ некоторых источников света

Источник	Яркость, св	$T_{\text{цв}}, ^\circ\text{K}$
Ночное безлунное небо	10^{-6}	—
Полная луна, видимая сквозь атмосферу	0,25	—
Ясное дневное небо	0,15—0,4	$(12 \div 24) \cdot 10^3$
Пламя стеариновой свечи	0,5	1930
Люминесцентные лампы	0,53— —0,66	—
Ацетиленовое пламя	10,8	2360
Штифт Нернста (2,3 вт/см^2)	260	—
Солнце у горизонта	600	—
Электрическая лампочка с вольфрамовым волоском газонаполненная		
12,9 лм/вт	597	2740
15,2 лм/вт	772	2810
18,1 лм/вт	1000	2920
21,2 лм/вт	1325	3000
Кратер угольной дуги	$17,2 \cdot 10^3$	3780
Капиллярная ртутная дуга сверхвысокого давления	$4 \cdot 10^4$	—
Кратер угольной дуги (наибольшая яркость, ток 150 а)	$8 \cdot 10^4$	$(5,0 \div 5,5) \times 10^3$
Шаровая ртутная лампа СВДШ	$12 \cdot 10^4$	—
Солнце в зените	$16,5 \cdot 10^4$	5400
Искра разряда		
в ксеноне	$1,1 \cdot 10^7$	—
в аргоне	$1,5 \cdot 10^7$	—
в воздухе	$2,1 \cdot 10^7$	—
в гелии	$1,5 \cdot 10^8$	—

31.5. СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Светочувствительностью называют обратную освещенности H величину S , которая создает на фотографическом слое определенную плотность почернения D [19]. В системе ГОСТ 2817—15 светочувствительность оценивается по критерию, представляющему собой диффузную оптическую плотность 0,2 сверх плотности вуали D_0 :

$$S_{0,2} = 1/H_{D=0,2+D_0},$$

где $[H] = [\text{люкс} \cdot \text{сек}]$.

В системе ДИН 4512

$$S = -10 \lg (H_{D=0,1+D_0}).$$

Таблица 31.29

Светочувствительность в различных сенситометрических системах

ГОСТ _{0,2}	11	16	22	32	45	65	90	130	180	250
X и D_{10}	250	350	500	700	900	1400	2000	3000	4000	6000
ДИН	12	13	15	17	18	20	21	23	24	26
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аллен К. У. Астрофизические величины. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
2. Кругер М. Я. и др. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Л., «Машиностроение», 1968.
3. Sosman R. B. The Properties of Silica. N. Y., Chemical Catalog Co., USA, 1927.
4. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. Л., «Машиностроение», 1970.
5. Кэй Дж., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1962.
6. Мотулевич Г. П. Металлооптика. — БСЭ., т. 16, с. 119.
7. Taschenbuch für Chemiker und Physiker. Berlin. Springer Verlag, 1943.
8. Воронкова Е. М. и др. Оптические материалы для инфракрасной техники. М., «Наука», 1965.

9. Chubb T. A., Friedman H. «Rev. Sci. Instrum.», 1955, v. 26, p. 493.
10. Смит Р., Джонс Ф., Чесмер Р. Обнаружение и измерение инфракрасного излучения. Пер. с англ. М., Изд-во иностран. лит., 1959.
11. Huffman R. E. e. a. «J. Chem. Phys.», 1964, т. 40, p. 356.
12. Инн Е. С. V., Zelickoff M. «J. Chem. Phys.», 1973, v. 21, p. 1026.
13. Калверт Дж., Питтс Дж. Фотохимия. Пер. с англ. М., «Мир», 1968.
14. Тарасов К. И. Спектральные приборы. Л., «Машиностроение», 1968.
15. Gubareff C. G. e. a. Review of the Thermal Radiation Property Values for Metals and Other Materials, 1957.
16. Садыков Б. С. Канд. диссертация. Московский энергет. ин-т им. Кржижановского, 1963.
17. Larrabee R. D. «J. Opt. Soc. Amer.», 1959, v. 49, p. 619.
18. Ландсберг Г. С. Оптика. М., Гостехиздат, 1952.
19. Краткий фотографический справочник. М., Госкиноиздат, 1952.

ГЛАВА 32

СПЕКТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ И НЕКОТОРЫЕ ПАРАМЕТРЫ МОЛЕКУЛ

32.1. КЛАССИФИКАЦИЯ СПЕКТРОВ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

Современное состояние теории спектров атомов вещества допускает достаточно строгое рассмотрение только в случае одноэлектронных атомов, т. е. в случае водорода и водородоподобных ионов He^+ , Li^{2+} , Be^{3+} и т. п. Теория спектров многоэлектронных атомов оснóвывается на приближении центрального самосогласованного поля, при котором состояние атома как целого определяется совокупностью состояний всех его электронов с учетом их взаимодействия.

В общем случае для атома с Z электронами уровни энергий характеризуются набором квантовых чисел отдельных электронов: главных квантовых чисел n_i , орбитальных (или азимутальных) квантовых чисел l_i , орбитальных магнитных квантовых чисел m_{li} и спиновых магнитных квантовых чисел m_{si} ($i = 1, 2, \dots, Z$). Набор главных квантовых чисел n_i принимает только целочисленные значения 1, 2, 3 и т. д.; квантовое число l_i может принимать целочисленные значения от 0 до $n_i - 1$; m_{li} при заданном l_i принимает $2l_i + 1$ значение: $l_i, (l_i - 1), \dots, (-l_i)$, и определяет проекцию орбитального момента электрона на заданное направление; m_{si} дает значение проекции на то же направление спинового момента электрона и может равняться только $+1/2$ и $-1/2$. Для последовательных значений l_i обычно используют буквенные обозначения:

$$l = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 \\ s, p, d, f, g, h, i, k, l, m, n, o, q, r, t$$

Распределение электронов в атоме при задании всех n_i и l_i определяет электронную конфигурацию. Минимуму энергии атома соответствует заполнение электронных оболочек с минимальными значениями n_i и соответствующими им минимальными l_i . Наибольшее число электронов, которые в соответствии с принципом Паули могут иметь одинаковые значения n_i и l_i , т. е. принадлежать одной оболочке, дает число заполнения оболочки $k = 2(2l_i + 1)$. Для обозначения различных оболочек используют запись nl^k . Таким образом, по мере роста заряда ядра атома при переходе от $Z = 1$ для водорода ко все большим значениям Z последовательно изменяется электронная конфигурация (табл. 32.1). Полностью заполненные внутренние оболочки обычно не указываются. Следует также отметить, что для больших значений Z последовательность заполнения, определенная выше, может нарушаться.

При нормальной связи между электронами в атоме, т. е. когда их электростатическое взаимодействие много больше магнитного, орбитальные моменты отдельных электронов складываются в полный орбитальный момент атома $L = \sum_i l_i$, а спиновые моменты s_i — в полный спиновой момент $S = \sum_i s_i$. Затем сложение L и S дает полный момент атома $J = L + S$. Уровни энергии атомов в этом случае обозначают символами $2S+1L_J$ и называют спектральными термами, или просто термами. Для обозначения термов используются заглавные буквы латинского алфавита:

$$L = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 \\ S, P, D, F, G, H, I, K, L, M, N, O, Q, R, T$$

Величина $2S + 1$ носит название мультиплетности термина и указывает число компонент в тонкой структуре уровня энергии, если $S \leq L$. В случае $S \geq L$ число компонент равно $2L + 1$, однако и в этом случае название мультиплетности сохраняется за числом $2S + 1$. Если мультиплетность термина равна 1, терм называется синглетным, 2 — дублетным, 3 — триплетным, 4 — квартетным и т. д. Термы основных состояний атомов приведены в табл. 32.1. Электронной конфигурации может соответствовать несколько термов. Терм с минимальной энергией (основной) может быть найден по правилу Гунда [1]. Сомнительные случаи и табл. 32.1. помечены знаком вопроса «?». В тех случаях, когда необходимо указывать четность состояний, относящихся к данному терму, нечетные термы отмечаются индексом o (odd — нечетный), который ставится справа сверху от L . Отсутствие индекса o указывает на четность термина. Все термы данной электронной конфигурации имеют одинаковую четность, так как четность определяется знаком выражения $(-1)^{l_1+l_2+\dots+l_Z}$ (+ для четного и — для нечетного термов).

В ряде случаев, особенно для атомов тяжелых элементов и многозарядных ионов, магнитное спин-орбитальное взаимодействие электронов значительно сильнее электростатического взаимодействия. Этот тип связи носит название jj -связи. Соответственно меняется и систематика уровней энергии атома [1].

Характерной особенностью спектров молекул, даже простейших — двухатомных, является то, что в них наряду с движением электронов существуют еще колебательные движения ядер относительно положения равновесия и вращательные движения молекулы в пространстве как целого. Это приводит к тому, что спектры молекул оказываются значительно сложнее спектров атомов.

Полная энергия молекулы складывается из трех частей (без учета взаимодействия различных движений)

$$E = E_{эл} + E(v) + E_v(J),$$

где $E_{эл}$, $E(v)$ и $E_v(J)$ — соответственно энергии электронного, колебательного и вращательного состояний.

В случае простейшей двухатомной молекулы имеем для колебательной энергии (в $см^{-1}$):

$$E(v) = \omega_e(v + 1/2) - \omega_e x_e(v + 1/2)^2 + \dots,$$

где ω_e и x_e — колебательные константы и v — колебательное квантовое число; v используется также для обозначения колебательных состояний. Вращательная энергия молекулы (в $см^{-1}$):

$$E_v(J) = B_v J(J + 1) - D_v J^2(J + 1)^2 + \dots,$$

где J — вращательное квантовое число: B_v и D_v — вращательные константы для колебательного состояния молекулы с квантовым числом v ; J — также используется для обозначения соответствующего вращательного состояния.

Частота перехода в молекуле определяется разностью энергий верхнего (со штрихом) и нижнего (без штриха) уровней (в $см^{-1}$):

$$\nu = E'_{эл} + E(v') + E_v(J') - E_{эл} - E(v) - E_v(J).$$

Чисто вращательные переходы сопровождаются только изменением J в заданном электронном или колебательном состоянии. Переход из верхнего состояния $J + 1$ в нижнее J обозначается $R(J)$. Колебательно-вращательные переходы сопровождаются изменением J и v в заданном электронном состоянии. В соответствии с правилами отбора переходы из вращательного состояния J верхнего колебательного уровня во вращательное состояние J нижнего колебательного уровня называют Q -ветвью. Такие переходы с $\Delta J = 0$ обозначают $Q(J)$. P -ветвь соответствует переходам из вращательного состояния $J - 1$ верхнего колебательного уровня во вращательное состояние J нижнего колебательного уровня и обозначается $P(J)$ ($\Delta J = -1$). Аналогично для R -ветви — $R(J)$ и $\Delta J = +1$ — имеем переход

из состояния $J + 1$ в J . P -, Q - и R -ветви, связанные с верхним колебательным уровнем v' и нижним колебательным уровнем v , называются вращательно-колебательной полосой и обозначаются $v' - v$.

Колебательно-вращательные полосы, связанные с переходами между двумя электронными уровнями, называются электронными системами и обозначаются символами соответствующих электронных состояний.

Классификация электронных состояний двухатомных молекул определяется, прежде всего, наличием аксиальной симметрии, а не центральной, как в атоме. В результате оказывается более важной проекция полного орбитального момента L на ось молекулы L_z . Для модуля L_z вводится квантовое число Λ , которое по аналогии с обозначениями $S, P, D, \dots$ принято обозначать буквами греческого алфавита:

$$\Lambda = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$$

$$\Sigma \quad \Pi \quad \Delta \quad \Phi \quad \Gamma \dots$$

Молекула, как и атом, характеризуется мультиплетностью электронных состояний. Мультиплетность уровня определяется и обозначается по указанным выше правилам. По отношению к отражению в плоскости симметрии, проходящей через ось молекулы, электронные состояния разделяются на положительные (+) и отрицательные (—), что указывается сверху справа у квантового числа Λ . Для линейных молекул, обладающих центром симметрии, электронные состояния делятся на четные (g) и нечетные (u), что указывается справа внизу у Λ . В ряде случаев перед символом термина Λ дается дополнительный символ ($A, B, C, X, \dots, a, b, c, \dots$), приписываемый каждому конкретному терму и не связанный однозначно со спектроскопическими характеристиками молекулы.

Электронные состояния многоатомных молекул в целом могут быть классифицированы по их свойствам симметрии. Для линейных многоатомных молекул применима та же классификация, что и для двухатомных. Для нелинейных многоатомных молекул не имеет определенного значения не только полный орбитальный момент L , но и его проекция L_z . В связи с этим классификация уровней энергии значительно усложняется [2].

Электронные конфигурации и основные термы атомов [1]

Таблица 32.1

Z	Атом	Электронная конфигурация	Основной терм	Z	Атом	Электронная конфигурация	Основной терм
1	H	1s	$^2S_{1/2}$	9	F	$2s^2 2p^5$	$^2P_{3/2}$
2	He	1s ²	$^1S_0$	10	Ne	$2s^2 2p^6$	$^1S_0$
3	Li	2s	$^2S_{1/2}$	11	Na	3s	$^3S_{1/2}$
4	Be	2s ²	$^3S_0$	12	Mg	3s ²	$^1S_0$
5	B	$2s^2 2p$	$^2P_{1/2}$	13	Al	$3s^2 3p$	$^2P_{1/2}$
6	C	$2s^2 2p^2$	$^3P_0$	14	Si	$3s^2 3p^2$	$^3P_0$
7	N	$2s^2 2p^3$	$^4S_{3/2}$	15	P	$3s^2 3p^3$	$^4S_{3/2}$
8	O	$2s^2 2p^4$	$^3P_2$	16	S	$3s^2 3p^4$	$^3P_2$

Z	Атом	Электронная конфигурация	Основной терм	Z	Атом	Электронная конфигурация	Основной терм
17	Cl	$3s^2 3p^5$	$2P_{\frac{3}{2}}$	55	Cs	6s	$2S_{1/2}$
18	Ar	$3s^2 3p^6$	$1S_0$	56	Ba	6s ²	$1S_0$
19	K	4s	$2S_{1/2}$	57	La	5d6s ²	$2D_{3/2}$
20	⁴⁵ Ca	4s ²	$2S_0$	58	Ce	4f ² 6s ²	$3H_{4?}$
21	Sc	3d4s ²	$2D_{3/2}$	59	Pr	4f ³ 6s ²	$4I^{\circ}_{13/2?}$
22	Ti	3d ² 4s ²	$3F_2$	60	Nd	4f ⁴ 6s ²	$5I_4$
23	V	3d ³ 4s ²	$4F_{3/2}$	61	Pm	4f ⁵ 6s ²	$6H_{5/2?}$
24	Cr	3d ⁵ 4s	$7S_3$	62	Sm	4f ⁶ 6s ²	$7F_0$
25	Mn	3d ⁵ 4s ²	$6S_{5/2}$	63	Eu	4f ⁷ 6s ²	$8S_{7/2}$
26	Fe	3d ⁶ 4s ²	$5D_4$	64	Gd	4f ⁷ 5d6s ²	$9D_2$
27	Co	3d ⁷ 4s ²	$4F_{9/2}$	65	Tb	4f ⁹ 6s ²	$6H_{17/2?}$
28	Ni	3d ⁸ 4s ²	$3F_4$	66	Dy	4f ¹⁰ 6s ²	$5I_{8?}$
29	Cu	3d ¹⁰ 4s	$2S_{1/2}$	67	Ho	4f ¹¹ 6s ²	$4I_{15/2}$
30	Zn	3d ¹⁰ 4s ²	$1S_0$	68	Er	4f ¹² 6s ²	$3H_6$
31	Ga	4s ² 4p	$2P_{1/2}$	69	Tm	4f ¹³ 6s ²	$2F_{7/2}$
32	Ge	4s ² 4p ²	$3P_0$	70	Yb	4f ¹⁴ 6s ²	$1S_0$
33	As	4s ² 4p ³	$4S_{3/2}$	71	Lu	4f ¹⁴ 5d6s ²	$2D_{1/2}$
34	Se	4s ² 4p ⁴	$3P_2$	72	Hf	5d ² 6s ²	$3F_2$
35	Br	4s ² 4p ⁵	$2P_{3/2}$	73	Ta	5d ³ 6s ²	$4F_{3/2}$
36	Kr	4s ² 4p ⁶	$1S_0$	74	W	5d ⁴ 6s ²	$5D_0$
37	Rb	5s	$2S_{1/2}$	75	Re	5d ⁵ 6s ²	$6S_{5/2}$
38	Sr	5s ²	$1S_0$	76	Os	5d ⁶ 6s ²	$5D_4$
39	Y	4d5s ²	$2D_{3/2}$	77	Ir	5d ⁷ 6s ²	$4F_{9/2}$
40	Zr	4d ² 5s ²	$3F_2$	78	Pt	5d ⁹ 6s	$3D_3$
41	Nb	4d ⁴ 5s	$6D_{1/2}$	79	Au	5d ¹⁰ 6s	$2S_{1/2}$
42	Mo	4d ⁵ 5s	$7S_3$	80	Hg	5d ¹⁰ 6s ²	$1S_0$
43	Tc	4d ⁶ 5s	$6S_{5/2}$	81	Tl	6s ² 6p	$2P_{1/2}$
44	Ru	4d ⁷ 5s	$5F_5$	82	Pb	6s ² 6p ²	$3P_0$
45	Rh	4d ⁸ 5s	$4F_{9/2}$	83	Bi	6s ² 6p ³	$4S_{3/2}$
46	Pd	4d ¹⁰	$1S_0$	84	Po	6s ² 6p ⁴	$3P_2$
47	Ag	4d ¹⁰ 5s	$2S_{1/2}$	85	At	6s ² 6p ⁵	$2P_{3/2}$
48	Cd	4d ¹⁰ 5s ²	$1S_0$	86	Rn	6s ² 6p ⁶	$1S_0$
49	In	5s ² 5p	$2P_{1/2}$	87	Fr	7s	$2S_{1/2}$
50	Sn	5s ² 5p ²	$3P_0$	88	Ra	7s ²	$1S_0$
51	Sb	5s ² 5p ³	$4S_{3/2}$	89	Ac	d ¹ 7s ²	$2D_{3/2}$
52	Te	5s ² 5p ⁴	$3P_2$	90	Th	6d ² 7s ²	$3F_2$
53	I	5s ² 5p ⁵	$2P_{3/2}$	91	Pa	5f ² 6d17s ²	$4K_{11/2}$
54	Xe	5s ² 5p ⁶	$1S_0$	92	U	5f ³ 6d17s ²	$5L_6$

Z	Атом	Электронная конфигурация	Основной терм	Z	Атом	Электронная конфигурация	Основной терм
93	Np	$5f^4 6d^1 7s^2$	$^6L_{11/2}$	97	Bk	$5f^9 7s^2$	$^8H_{17/2}$
94	Pu	$5f^6 6d^1 7s^2$	$^7F_6$	98	Cf	$5f^{10} 7s^2$	$^5I_8$
95	Am	$5f^7 7s^2$	$^8S_{7/2}$	99	Es	$5f^{11} 7s^2$	$^4I_{15/2}$
96	Cm	$5f^7 6d^1 7s^2$	$^9D_2$				

32.2. ПЕРЕХОД ОТ ДЛИН ВОЛН, ИЗМЕРЕННЫХ В ВОЗДУХЕ, К ДЛИНАМ ВОЛН В ВАКУУМЕ

формула:

$$\lambda_{\text{вак}} = n \lambda_{\text{возд}}$$

Для перехода к значениям длин волн в вакууме $\lambda_{\text{вак}}$ от значений длин волн в воздухе $\lambda_{\text{возд}}$ используется

где n — показатель преломления сухого воздуха при температуре $t = 15^\circ\text{C}$ и давлении 760 мм рт. ст.

Таблица 32.2

Поправка $\Delta\lambda$, Å, для перехода к длинам волн в вакууме

$$\Delta\lambda = \lambda_{\text{вак}} - \lambda_{\text{возд}} \text{ для } \lambda_{\text{возд}} = 200 \div 5000 \text{ нм.}$$

При $\lambda < 200$ нм обычно применяют длины волн в вакууме. Таблица перехода составлена для сухого воздуха. Для воздуха с влажностью до 100% поправки в видимой области изменяются приблизительно на 0,01 нм [3].

$\lambda_{\text{возд}}, \text{ нм}$	00	10	20	30	40	50	60	70	80	90
200	0,651	0,670	0,689	0,710	0,731	0,754	0,776	0,800	0,824	0,848
300	0,872	0,897	0,922	0,947	0,972	0,998	1,023	1,049	1,075	1,101
400	1,127	1,153	1,179	1,205	1,232	1,258	1,285	1,311	1,338	1,364
500	1,391	1,417	1,444	1,471	1,497	1,524	1,551	1,578	1,604	1,631
600	1,658	1,685	1,712	1,739	1,766	1,792	1,819	1,846	1,873	1,900
700	1,927	1,954	1,981	2,008	2,035	2,062	2,089	2,116	2,143	2,170
800	2,197	2,224	2,251	2,278	2,305	2,333	2,360	2,387	2,414	2,441
900	2,468	2,495	2,522	2,549	2,576	2,604	2,631	2,658	2,685	2,712
1000	2,739	2,766	2,793	2,821	2,848	2,875	2,902	2,929	2,956	2,983
1100	3,011	3,038	3,065	3,092	3,119	3,146	3,174	3,201	3,228	3,255
1200	3,282	3,309	3,336	3,364	3,391	3,418	3,445	3,472	3,500	3,527
1300	3,554	3,581	3,608	3,636	3,663	3,690	3,717	3,744	3,772	3,799
1400	3,826	3,853	3,880	3,908	3,935	3,962	3,989	4,016	4,044	4,071
1500	4,098	4,125	4,152	4,180	4,207	4,234	4,261	4,288	4,316	4,343
1600	4,370	4,397	4,425	4,452	4,479	4,506	4,533	4,560	4,588	4,615
1700	4,642	4,669	4,697	4,723	4,751	4,778	4,806	4,832	4,860	4,887
1800	4,915	4,942	4,969	4,996	5,023	5,051	5,078	5,105	5,132	5,159
1900	5,187	5,214	5,241	5,268	5,296	5,323	5,350	5,377	5,405	5,432
$\lambda_{\text{возд}}, \text{ нм}$	000	100	200	300	400	500	600	700	800	900
2000	5,459	5,731	6,004	6,276	6,549	6,821	7,093	7,366	7,638	7,911
3000	8,183	8,456	8,728	9,001	9,274	9,546	9,818	10,091	10,363	10,636
4000	10,909	11,181	11,454	11,727	11,999	12,272	12,544	12,817	13,089	13,362
5000	13,635									

32.3. ВЕРОЯТНОСТИ РАДИАЦИОННЫХ ПЕРЕХОДОВ В АТОМЕ ВОДОРОДА

Вероятность спонтанного радиационного перехода A_{ki} (в единицу времени) с уровня k на уровень i в атоме водорода определяется выражением

$$A_{ik} = \frac{2e^2 (E_k - E_i)^2}{mc^3} \frac{n_i^2}{n_k^2} f_{ik},$$

где e , m — заряд и масса электрона; c — скорость света в вакууме; n , E — главное квантовое число и энергия уровня, f_{ik} — сила осциллятора.

Таблица 32.3

Переходы $n_i \rightarrow n_k$ в атоме водорода [4]

$n_i \rightarrow n_k$	λ , нм	E_i , см ⁻¹	E_k , см ⁻¹	A_{ki} , сек ⁻¹	f_{ik}
1—2 (L_α)	121,567	0	82 259	4,699·10 ⁸	0,4162
1—3 (L_β)	102,572	0	97 492	5,575·10 ⁷	7,910·10 ⁻²
1—4 (L_γ)	97,2537	0	102 894	1,278·10 ⁷	2,899·10 ⁻²
1—5 (L_δ)	94,9743	0	105 292	4,125·10 ⁶	1,394·10 ⁻²
1—6 (L_ϵ)	93,7803	0	106 632	1,644·10 ⁶	7,799·10 ⁻³
1—7	93,0748	0	107 440	7,568·10 ⁵	4,814·10 ⁻³
1—8	92,6226	0	107 965	3,869·10 ⁵	3,183·10 ⁻³
1—9	92,3150	0	108 325	2,143·10 ⁵	2,216·10 ⁻³
1—10	92,0963	0	108 582	1,263·10 ⁵	1,605·10 ⁻³
1—11	91,9352	0	108 772	7,834·10 ⁴	1,201·10 ⁻³
1—12	91,8129	0	108 917	5,066·10 ⁴	9,214·10 ⁻⁴
1—13	91,7181	0	109 030	3,393·10 ⁴	7,227·10 ⁻⁴
1—14	91,6429	0	109 119	2,341·10 ⁴	5,774·10 ⁻⁴
1—15	91,5824	0	109 191	1,657·10 ⁴	4,686·10 ⁻⁴
1—16	91,5329	0	109 250	1,200·10 ⁴	3,856·10 ⁻⁴
1—17	91,4919	0	109 299	8858	3,211·10 ⁻⁴
1—18	91,4576	0	109 340	6654	2,702·10 ⁻⁴
1—19	91,4286	0	109 375	5077	2,296·10 ⁻⁴
1—20	91,4039	0	109 405	3928	1,967·10 ⁻⁴
1—21	91,3826	0	109 430	3077	1,698·10 ⁻⁴
1—22	91,3641	0	109 452	2438	1,476·10 ⁻⁴
1—23	91,3480	0	109 471	1952	1,291·10 ⁻⁴
1—24	91,3339	0	109 488	1578	1,1136·10 ⁻⁴
1—25	91,3215	0	109 503	1286	1,005·10 ⁻⁴
1—26	91,3104	0	109 517	1057	8,928·10 ⁻⁵
1—27	91,3006	0	109 528	875,3	7,970·10 ⁻⁵
1—28	91,2918	0	109 539	729,7	7,144·10 ⁻⁵
1—29	91,2832	0	109 548	612,2	6,429·10 ⁻⁵
1—30	91,2768	0	109 577	516,7	5,806·10 ⁻⁵
1—31	91,2703	0	109 565	438,6	5,261·10 ⁻⁵
1—32	91,2645	0	109 572	374,2	4,782·10 ⁻⁵
1—33	91,2592	0	109 578	320,8	4,360·10 ⁻⁵
1—34	91,2543	0	109 584	276,3	3,986·10 ⁻⁵
1—35	91,2499	0	109 589	239,0	3,653·10 ⁻⁵
1—36	91,2958	0	109 594	207,6	3,357·10 ⁻⁵
1—37	91,2420	0	109 599	181,0	3,092·10 ⁻⁵
1—38	91,2385	0	109 603	158,4	2,854·10 ⁻⁵
1—39	91,2353	0	109 607	139,1	2,640·10 ⁻⁵
1—40	91,2324	0	109 610	122,6	2,446·10 ⁻⁵
2—3 (H_α)	656,280	82 259	97 492	4,410·10 ⁷	0,6407
2—4 (H_β)	486,132	82 259	102 824	8,419·10 ⁶	0,1193
2—5 (H_γ)	434,046	82 259	105 292	2,530·10 ⁶	4,467·10 ⁻²
2—6 (H_δ)	410,173	82 259	106 632	9,732·10 ⁵	2,209·10 ⁻²
2—7 (H_ϵ)	397,007	82 259	107 440	4,389·10 ⁵	1,270·10 ⁻²
2—8	388,905	82 259	107 965	2,215·10 ⁵	8,036·10 ⁻³
2—9	383,538	82 259	108 325	1,216·10 ⁵	5,429·10 ⁻³
2—10	379,790	82 259	108 582	7,122·10 ⁴	3,851·10 ⁻³
2—11	377,063	82 259	108 772	4,397·10 ⁴	2,835·10 ⁻³
2—12	375,015	82 259	108 917	2,874·10 ⁴	2,151·10 ⁻³
2—13	373,437	82 259	109 030	1,893·10 ⁴	1,672·10 ⁻³

$n_i \rightarrow n_k$	$\lambda, \text{нм}$	$E_i, \text{см}^{-1}$	$E_k, \text{см}^{-1}$	$A_{ki}, \text{сек}^{-1}$	f_{ik}
2—14	372,194	82 259	109119	$1,303 \cdot 10^4$	$1,326 \cdot 10^{-3}$
2—15	371,197	82 259	109 191	9210	$1,070 \cdot 10^{-3}$
2—16	370,385	82 259	109 250	6658	$8,764 \cdot 10^{-4}$
2—17	369,715	82 259	109 299	4910	$7,270 \cdot 10^{-4}$
2—18	369,155	82 259	109 340	3685	$6,099 \cdot 10^{-4}$
2—19	368,683	82 259	109 375	2809	$5,167 \cdot 10^{-4}$
2—20	368,281	82 259	109 405	2172	$4,416 \cdot 10^{-4}$
2—21	367,935	82 259	109 430	1700	$3,808 \cdot 10^{-4}$
2—22	367,636	82 259	109 452	1347	$3,302 \cdot 10^{-4}$
2—23	367,376	82 259	109 471	1078	$2,884 \cdot 10^{-4}$
2—24	367,148	82 259	109 488	870,7	$2,534 \cdot 10^{-4}$
2—25	366,946	82 259	109 503	709,6	$2,238 \cdot 10^{-4}$
2—26	366,768	82 259	109 517	583,0	$1,987 \cdot 10^{-4}$
2—27	366,610	82 259	109 528	482,6	$1,772 \cdot 10^{-4}$
2—28	366,468	82 259	109 539	402,2	$1,587 \cdot 10^{-4}$
2—29	366,340	82 259	109 548	337,4	$1,427 \cdot 10^{-4}$
2—30	366,226	82 259	109 557	284,7	$1,288 \cdot 10^{-4}$
2—31	366,122	82 259	109 565	241,6	$1,167 \cdot 10^{-4}$
2—32	366,028	82 259	109 572	206,1	$1,060 \cdot 10^{-4}$
2—33	365,942	82 259	109 578	176,7	$9,658 \cdot 10^{-5}$
2—34	365,864	82 259	109 584	152,2	$8,825 \cdot 10^{-5}$
2—35	365,792	82 259	109 589	131,6	$8,086 \cdot 10^{-5}$
2—36	365,727	82 259	109 594	114,3	$7,427 \cdot 10^{-5}$
2—37	365,666	82 259	109 599	99,66	$6,837 \cdot 10^{-5}$
2—38	365,611	82 259	109 603	87,20	$6,309 \cdot 10^{-5}$
2—39	365,559	82 259	109 607	76,57	$5,834 \cdot 10^{-5}$
2—40	365,512	82 259	109 610	67,46	$5,405 \cdot 10^{-5}$
3—4 (P_{α})	1875,10	97 492	102 824	$8,986 \cdot 10^6$	0,8421
3—5 (P_{β})	1281,81	97 492	105 292	$2,201 \cdot 10^6$	0,1506
3—6 (P_{γ})	1093,81	97 492	106 632	$7,783 \cdot 10^5$	$5,584 \cdot 10^{-2}$
3—7 (P_{δ})	1004,94	97 492	107 440	$3,358 \cdot 10^5$	$2,768 \cdot 10^{-2}$
3—8 (P_{ϵ})	954,598	97 492	107 965	$1,651 \cdot 10^5$	$1,604 \cdot 10^{-2}$
3—9	922,902	97 492	108 325	$8,905 \cdot 10^4$	$1,023 \cdot 10^{-2}$
3—10	901,491	97 492	108 582	$5,156 \cdot 10^4$	$6,980 \cdot 10^{-3}$
3—11	886,279	97 492	108 772	$3,156 \cdot 10^4$	$4,996 \cdot 10^{-3}$
3—12	875,047	97 492	108 917	$2,021 \cdot 10^4$	$3,711 \cdot 10^{-3}$
3—13	866,502	97 492	109 030	$1,343 \cdot 10^4$	$2,839 \cdot 10^{-3}$
3—14	859,839	97 492	109 119	9211	$2,224 \cdot 10^{-3}$
3—15	854,539	97 492	109 191	6490	$1,776 \cdot 10^{-3}$
3—16	850,249	97 492	109 250	4680	$1,443 \cdot 10^{-3}$
3—17	846,726	97 492	109 299	3444	$1,188 \cdot 10^{-3}$
3—18	843,796	97 492	109 340	2580	$9,916 \cdot 10^{-4}$
3—19	841,332	97 492	109 375	1964	$8,361 \cdot 10^{-4}$
3—20	839,240	97 492	109 405	1517	$7,118 \cdot 10^{-4}$

32.4. СПЕКТРЫ НЕКОТОРЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И БЛАГОРОДНЫХ ГАЗОВ

На рис. 32.1—32.7 — приведены диаграммы энергетических уровней нейтральных атомов Li, H, Na, He, K, Cs и Hg. На диаграммах указаны наиболее интенсивные переходы и соответствующие им длины волн λ , нм. В табл. 32.4—32.7 представлены наиболее яркие линии излучения благородных газов Ne, Ar, Kr и Xe и дана их классификация. При составлении диаграмм и таблиц использовались работы [5—7]. Звездочками отмечены линии, рекомендуемые в работе [3] в качестве стандартов длин волн. Символами E_H и E_B обозначены соответственно значения энергии нижнего и верхнего уровней, между которыми происходит переход.

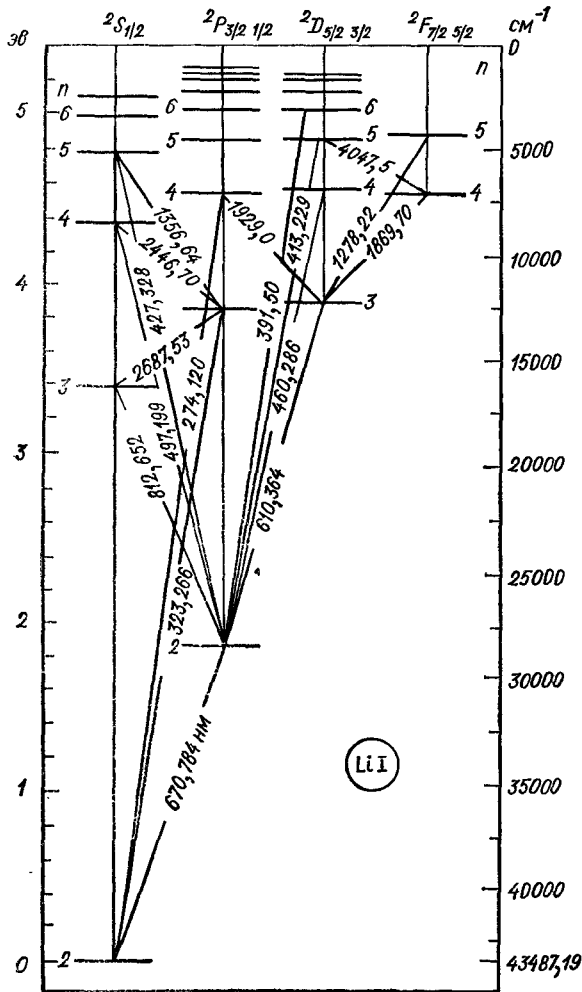


Рис. 32.1. Спектр лития [5].

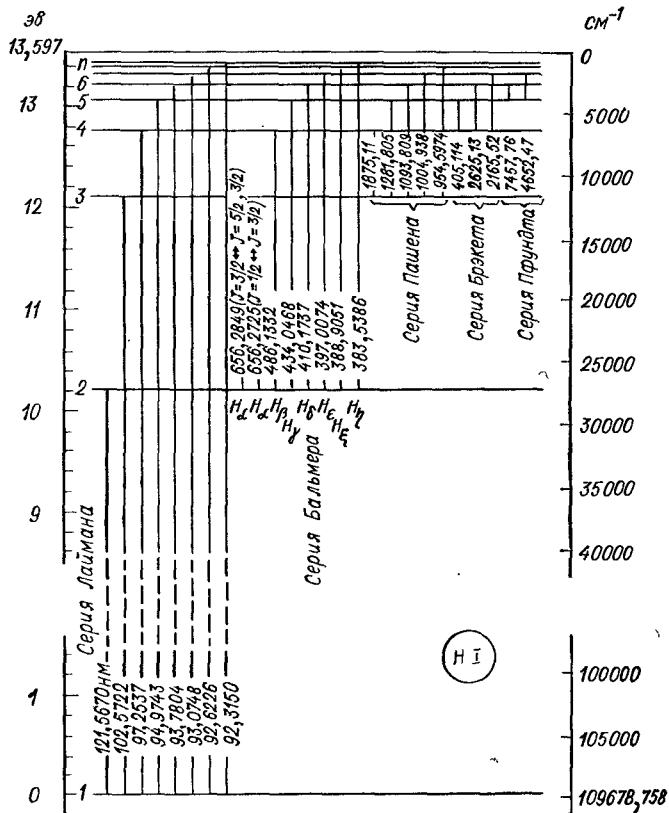


Рис. 32.2. Спектр атомарного водорода [5].

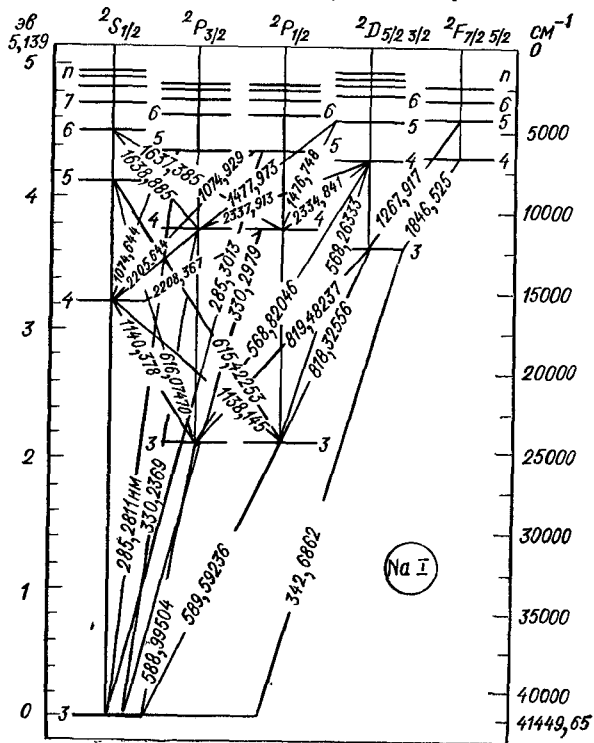
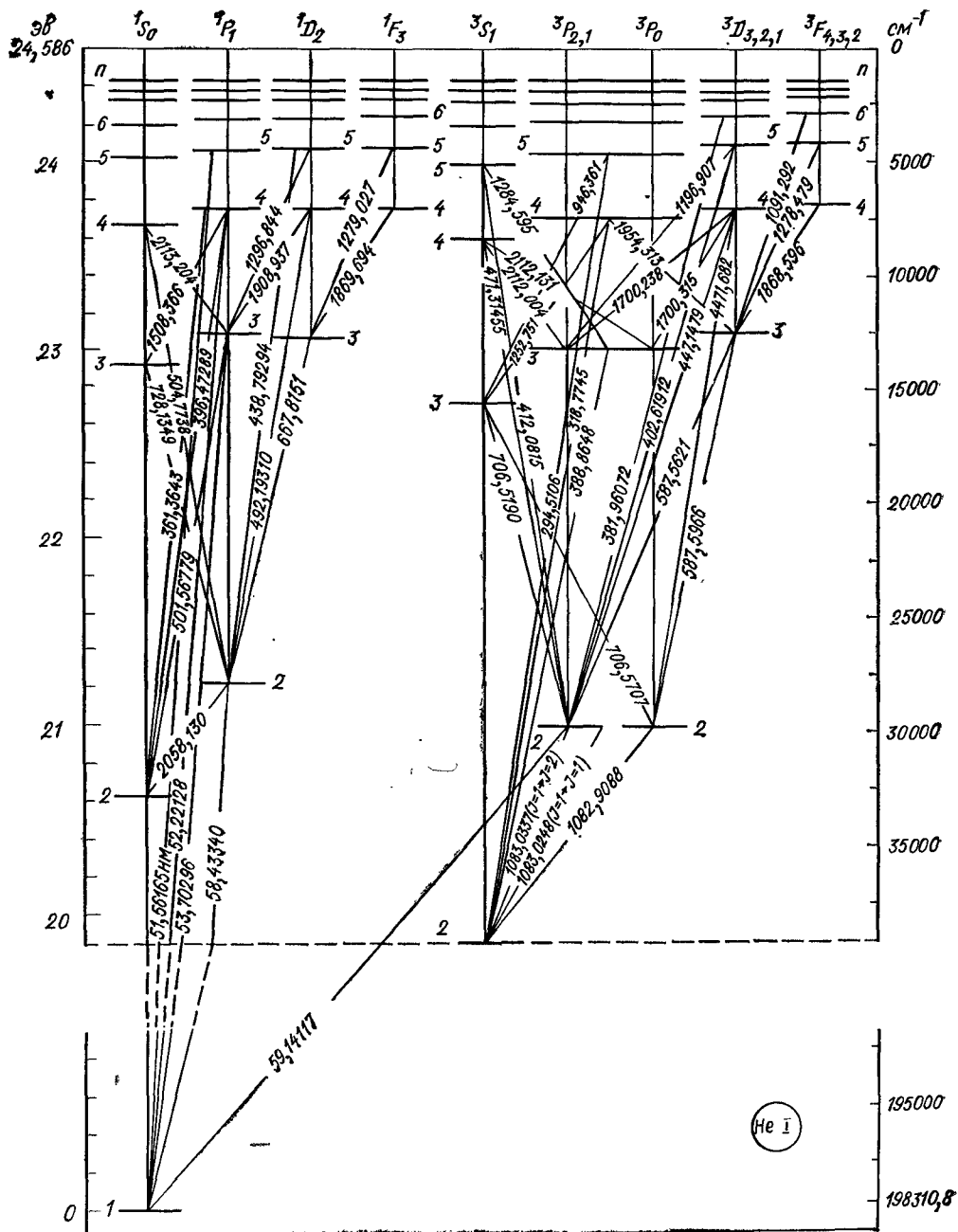
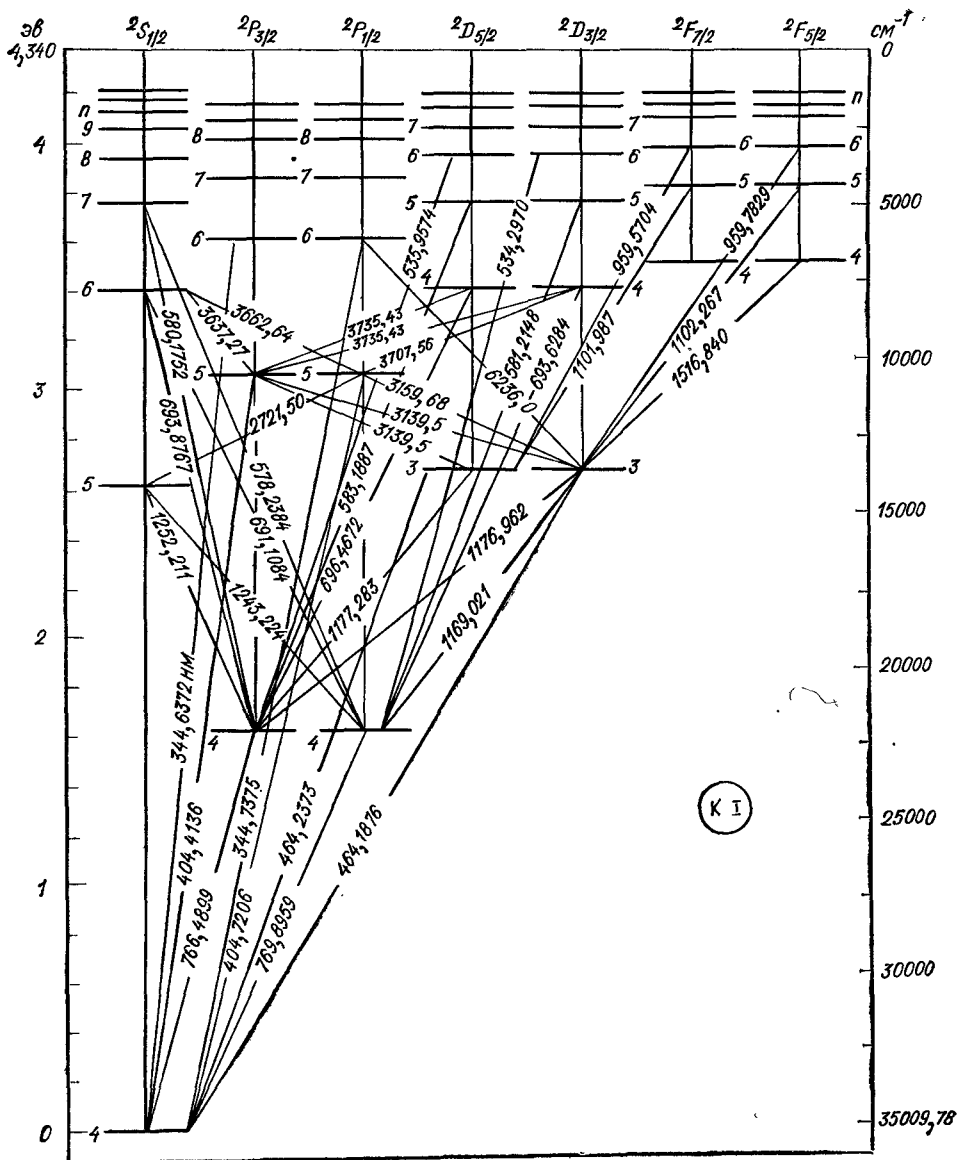


Рис. 32.3. Спектр натрия [5].





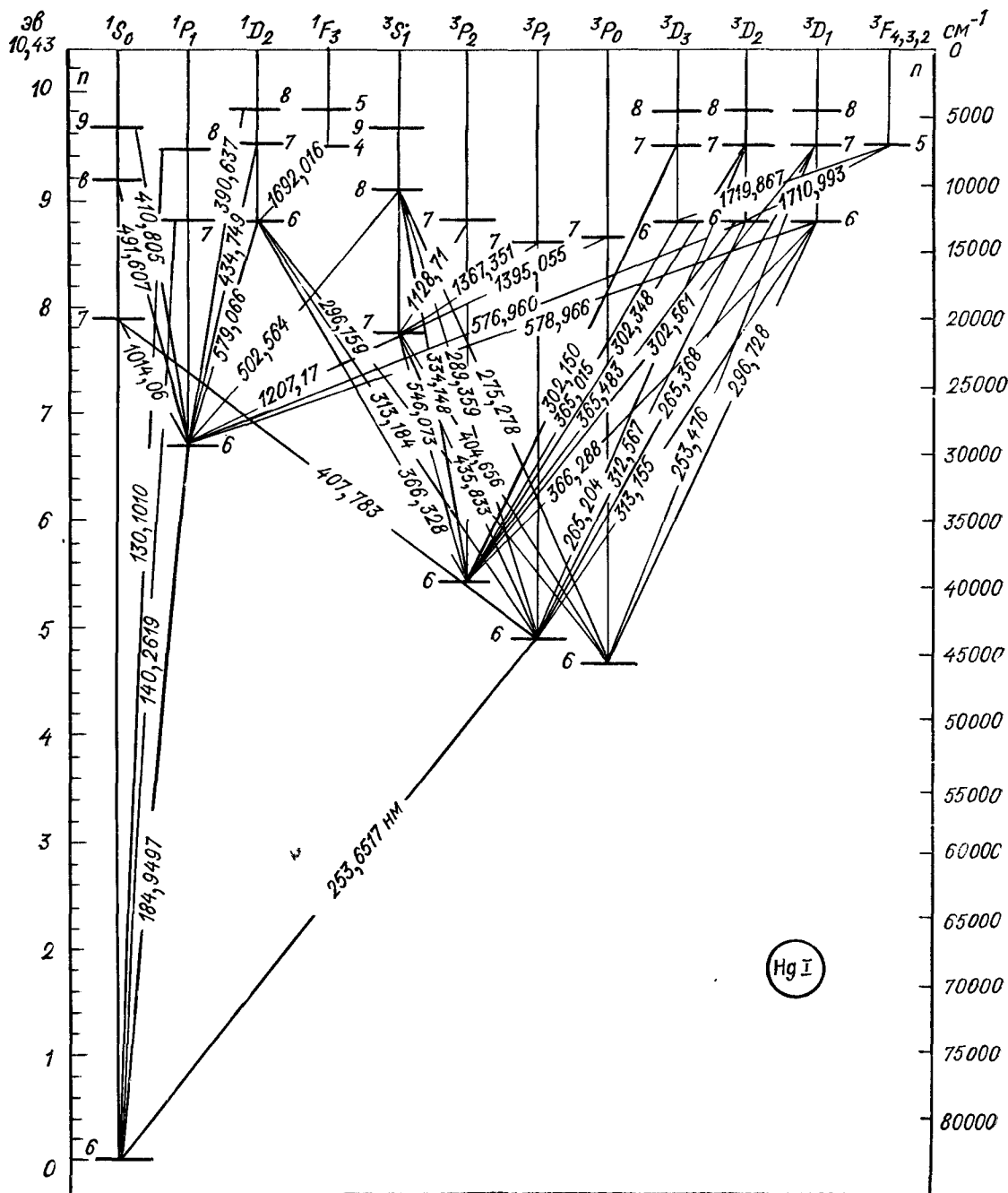


Рис. 32.7. Спектр ртути [5, 6].

Спектральные линии Ne I [5]

λ , нм	E_H , эв	E_V , эв	Переход
2395,13	19,78	20,30	$4s'[1/2]_1 - 4p'[1/2]_2$
2363,63	19,66	20,19	$4s[1/2]_2 - 4p[2/2]_3$
2252,97	19,66	20,21	$4s[1/2]_2 - 4p[1/2]_2$
1859,730	20,05	20,71	$3d[2/2]_3 - 4f[3/2]_{3,4}$
1842,243	20,14	20,81	$3d'[1/2]_2 - 4f'[2/2]_{2,3}$
1839,010	20,14	20,81	$3d'[2/2]_3 - 4f'[3/2]_{3,4}$
1838,517	20,14	20,81	$3d'[2/2]_2 - 4f'[3/2]_{2,3}$
1830,400	20,04	20,71	$3d[1/2]_2 - 4f[2/2]_{2,3}$
1828,258	20,03	20,71	$3d[3/2]_3 - 4f[4/2]_{2,4}$
1827,659	20,03	20,71	$3d[3/2]_4 - 4f[4/2]_{4,5}$
1808,271	20,02	20,71	$3d[1/2]_1 - 4f[1/2]_{1,2}$
1152,282	18,70	19,78	$3p'[1/2]_2 - 4s'[1/2]_1$
1140,924	18,69	19,78	$3p'[1/2]_1 - 4s'[1/2]_1$
1139,053	18,57	19,66	$3p[2/2]_2 - 4s[1/2]_2$
1117,759	18,55	19,66	$3p[2/2]_3 - 4s[1/2]_2$
1114,309	18,57	19,69	$3p[2/2]_2 - 4s[1/2]_1$
1084,454	18,63	19,78	$3p[1/2]_2 - 4s'[1/2]_1$
1079,812	18,61	19,76	$3p[1/2]_1 - 4s'[1/2]_1$
1056,243	18,96	20,14	$3p'[1/2]_1 - 3d[1/2]_1$
966,5424	18,38	19,66	$3p[1/2]_1 - 4s[1/2]_2$
932,652	18,71	20,04	$3p[1/2]_1 - 3d[1/2]_1$
920,176	18,69	20,04	$3p'[1/2]_1 - 3d[1/2]_1$
914,868	18,69	20,05	$3p'[1/2]_1 - 3d[2/2]_2$
885,38669	18,63	20,04	$3p[1/2]_2 - 3d[1/2]_2$
878,37539	18,72	20,14	$3p'[1/2]_1 - 3d'[1/2]_2$
878,06223	18,63	20,05	$3p[1/2]_2 - 3d[2/2]_3$
865,43837	18,70	20,14	$3p'[1/2]_2 - 3d[2/2]_3$
863,46472	18,61	20,05	$3p[1/2]_1 - 3d[2/2]_2$
837,76062	18,55	20,03	$3p[2/2]_3 - 3d[3/2]_4$
831,03248	18,55	20,05	$3p[2/2]_3 - 3d[2/2]_3$
808,24576	16,85	18,38	$3s'[1/2]_1 - 3p[1/2]_1$
743,88981	16,71	18,38	$3s'[1/2]_1 - 3p[1/2]_1$
724,51665	16,67	18,38	$3s[1/2]_1 - 3p[1/2]_1$
717,39380	16,85	18,57	$3s'[1/2]_1 - 3p[2/2]_1$
703,24128*	16,62	18,38	$3s[1/2]_2 - 3p[1/2]_1$
702,40500	16,85	18,61	$3s'[1/2]_1 - 3p[1/2]_1$
692,94672	16,85	18,63	$3s'[1/2]_1 - 3p[1/2]_2$
667,82764*	16,85	18,70	$3s'[1/2]_1 - 3p'[1/2]_2$
665,20925	16,85	18,71	$3s'[1/2]_1 - 3p[1/2]_2$
659,89529*	16,85	18,72	$3s'[1/2]_1 - 3p'[1/2]_1$
640,22460	16,62	18,55	$3s[1/2]_2 - 3p[2/2]_3$
638,29914*	16,67	18,61	$3s[1/2]_1 - 3p[1/2]_1$
633,44279*	16,62	18,57	$3s[1/2]_2 - 3p[2/2]_2$
626,64950*	16,71	18,69	$3s'[1/2]_1 - 3p'[1/2]_1$
621,72813*	16,62	18,61	$3s[1/2]_2 - 3p[1/2]_1$
616,35939*	16,71	18,72	$3s'[1/2]_1 - 3p'[1/2]_1$
614,30623*	16,62	18,63	$3s[1/2]_2 - 3p[1/2]_2$
609,61630*	16,67	18,70	$3s[1/2]_1 - 3p'[1/2]_2$
607,43377*	16,67	18,71	$3s[1/2]_1 - 3p[1/2]_1$
602,99971*	16,67	18,72	$3s[1/2]_1 - 3p'[1/2]_1$
597,55340*	16,62	18,69	$3s[1/2]_2 - 3p'[1/2]_1$
588,18950*	16,62	18,72	$3s[1/2]_2 - 3p'[1/2]_1$
585,24878*	16,85	18,96	$3s'[1/2]_1 - 3p'[1/2]_1$
576,44188	18,55	20,70	$3p[2/2]_3 - 4d[1/2]_4$
540,05616	16,67	18,96	$3s[1/2]_1 - 3p'[1/2]_1$
534,32834	18,38	20,70	$3p[1/2]_1 - 4d[1/2]_1$
534,10938	18,38	20,70	$3p[1/2]_1 - 4d[1/2]_1$
533,07775	18,38	20,71	$3p[1/2]_1 - 4d[1/2]_2$
495,70335	18,61	21,11	$3p[1/2]_1 - 5d'[1/2]_2$
488,49170	18,70	21,24	$3p'[1/2]_2 - 7s'[1/2]_1$
	18,57	21,11	$3p[2/2]_2 - 5d'[2/2]_3$

λ , нм	E_H , эв	E_V , эв	Переход
482,73444	18,38	21,95	$3p[1/2]_1 - 6s[1/2]_1$
478,89270	18,55	21,14	$3p[2/2]_3 - 7s[1/2]_2$
471,53466	18,55	21,18	$3p[2/2]_3 - 6d[3/2]_4$
471,2066	18,55	21,18	$3p[2/2]_3 - 6d[2/2]_3$
471,00669	18,38	21,01	$3p[1/2]_1 - 5d[1/2]_1$
470,88619	18,38	21,01	$3p[1/2]_1 - 5d[1/2]_1$
470,43949	18,38	21,02	$3p[1/2]_1 - 5d[1/2]_2$
453,77545	18,38	21,11	$3p[1/2]_1 - 5d'[2/2]_2$
442,48096	18,38	21,18	$3p[1/2]_1 - 6d[1/2]_1$
442,25205	18,38	21,18	$3p[1/2]_1 - 6d[1/2]_1$
359,3640	16,85	20,30	$3s'[1/2]_1 - 4p'[1/2]_1$
359,35263	16,85	20,30	$3s'[1/2]_1 - 4p'[1/2]_2$
352,04714	16,85	20,37	$3s'[1/2]_1 - 4p'[1/2]_1$
351,51900	16,67	20,20	$3s[1/2]_1 - 4p[2/2]_2$
350,12154	16,67	20,21	$3s[1/2]_1 - 4p[1/2]_1$
347,25706	16,62	20,19	$3s[1/2]_2 - 4p[2/2]_3$
346,65781	16,71	20,29	$3s'[1/2]_1 - 4p'[1/2]_1$
344,77022	16,62	20,21	$3s[1/2]_2 - 4p[1/2]_2$
341,79031	16,67	20,30	$3s[1/2]_1 - 4p'[1/2]_2$
336,99069	16,62	20,30	$3s[1/2]_2 - 4p'[1/2]_1$
336,98076	16,62	20,30	$3s[1/2]_2 - 4p'[1/2]_2$
335,1744	16,67	20,37	$3s[1/2]_1 - 4p'[1/2]_1$
297,4714	16,62	20,78	$3s[1/2]_2 - 5p[1/2]_2$
264,742	16,62	21,30	$3s[1/2]_2 - 8p[1/2]_{2,1}$
74,3721	0,00	16,67	$2p^6 1S_0 - 3s[1/2]_1$
73,5892	0,00	16,85	$2p^6 1S_0 - 3s'[1/2]_1$
62,9729	0,00	19,69	$2p^6 1S_0 - 4s[1/2]_1$
62,6819	0,00	19,78	$2p^6 1S_0 - 4s'[1/2]_1$
61,9092	0,00	20,02	$2p^6 1S_0 - 3d[1/2]_1$
61,8668	0,00	20,04	$2p^6 1S_0 - 3d[1/2]_1$
61,5623	0,00	20,14	$2p^6 1S_0 - 3d'[1/2]_1$
60,2712	0,00	20,56	$2p^6 1S_0 - 5s[1/2]_1$

Таблица 32.5

Спектральные линии Ag I [5]

λ , нм	E_H , эв	E_V , эв	Переход
2098,610	13,27	13,86	$4p[1/2]_1 - 3d[1/2]_1$
2061,621	13,30	13,90	$4p'[1/2]_1 - 3d[1/2]_2$
	13,30	14,01	$4p'[1/2]_2 - 3d[3/2]_3$
1744,493	13,15	13,86	$4p'[1/2]_1 - 3d[1/2]_1$
1530,226	14,10	14,91	$3d[2/2]_3 - 4f[3/2]_{3,4}$
1409,361	13,27	14,15	$4p[1/2]_1 - 3d[1/2]_1$
1391,083	14,01	14,90	$3d[3/2]_3 - 4f[4/2]_4$
1371,877	13,08	13,98	$4p[2/2]_3 - 3d[3/2]_4$
1367,853	13,33	14,23	$4p'[1/2]_1 - 3d'[1/2]_2$
1362,238	13,15	14,06	$4p[1/2]_1 - 3d[2/2]_2$
1350,399	13,09	14,01	$4p[2/2]_2 - 3d[3/2]_3$
1340,657	13,98	14,90	$3d[3/2]_4 - 4f[4/2]_5$
1336,738	13,17	14,10	$4p[1/2]_2 - 3d[2/2]_3$
1331,339	13,28	14,21	$4p'[1/2]_1 - 3d'[2/2]_2$
1327,305	13,30	14,24	$4p'[1/2]_2 - 3d'[2/2]_3$
1322,849	13,08	14,01	$4p[2/2]_3 - 3d[3/2]_3$
1300,847	13,30	14,25	$4p'[1/2]_2 - 5s'[1/2]_1$
1295,659	12,91	13,86	$4p[1/2]_1 - 3d[1/2]_1$
1280,268	13,09	14,06	$4p[2/2]_2 - 3d[2/2]_2$
1248,763	13,08	14,07	$4p[2/2]_3 - 5s[1/2]_2$
1245,605	13,09	14,09	$4p[2/2]_2 - 5s[1/2]_1$
1243,919	12,91	13,90	$4p[1/2]_1 - 3d[1/2]_2$

λ , нм	E_H , эВ	E_B , эВ	Переход
1240,288	13,15	14,15	$4p[1^1/2]_1 - 3d[1^1/2]_1$
1211,220	13,08	14,10	$4p[2^1/2]_3 - 3d[2^1/2]_3$
1148,812	11,83	12,91	$4s'[1^1/2]_1 - 4p[1^1/2]_1$
1107,887	13,09	14,21	$4p[2^1/2]_2 - 3d'[2^1/2]_2$
1095,074	13,17	14,30	$4p[1^1/2]_2 - 3d'[1^1/2]_1$
1088,096	13,09	14,23	$4p[2^1/2]_2 - 3d'[1^1/2]_2$
1068,178	13,08	14,24	$4p[2^1/2]_3 - 3d'[2^1/2]_3$
1067,355	12,91	14,07	$4p[1^1/2]_1 - 5s[1^1/2]_2$
1047,810	12,91	14,09	$4p[1^1/2]_1 - 5s[1^1/2]_1$
1047,0051	11,72	12,91	$4s'[1^1/2]_0 - 4p[1^1/2]_1$
1005,210	13,98	15,21	$3d[3^1/2]_4 - 5f[4^1/2]_{4,5}$
978,45010	11,83	13,09	$4s'[1^1/2]_1 - 4p[2^1/2]_2$
965,77841	11,62	12,91	$4s[1^1/2]_1 - 4p[1^1/2]_1$
935,4218	11,83	13,15	$4s'[1^1/2]_1 - 4p[1^1/2]_1$
922,44955	11,83	13,17	$4s'[1^1/2]_1 - 4p[1^1/2]_2$
912,29660	11,55	12,91	$4s[1^1/2]_2 - 4p[1^1/2]_1$
866,79438	11,72	13,15	$4s'[1^1/2]_0 - 2p[1^1/2]_1$
852,14428	11,83	13,28	$4s[1^1/2]_1 - 4p'[1^1/2]_1$
842,46473	11,62	13,09	$4s[1^1/2]_1 - 4p[2^1/2]_2$
840,82094	11,83	13,30	$4s'[1^1/2]_1 - 4p'[1^1/2]_2$
826,45221	11,83	13,33	$4s'[1^1/2]_1 - 4p'[1^1/2]_1$
811,53108	11,55	13,08	$4s[1^1/2]_2 - 4p[2^1/2]_3$
810,36920	11,62	13,15	$4s[1^1/2]_1 - 4p[1^1/2]_1$
801,47853	11,55	13,09	$4s[1^1/2]_2 - 4p[2^1/2]_2$
800,61566	11,62	13,17	$4s[1^1/2]_1 - 4p[1^1/2]_2$
794,81755	11,72	13,28	$4s'[1^1/2]_0 - 4p'[1^1/2]_1$
772,42064	11,72	13,33	$4s'[1^1/2]_0 - 4p'[1^1/2]_1$
772,37599	11,55	13,15	$4s[1^1/2]_2 - 4p[1^1/2]_1$
763,51056	11,55	13,17	$4s[1^1/2]_2 - 4p[1^1/2]_2$
751,46514	11,62	13,27	$4s[1^1/2]_1 - 4p[1^1/2]_0$
750,38685	11,83	13,48	$4s'[1^1/2]_1 - 4p'[1^1/2]_0$
738,39796	11,62	13,30	$4s[1^1/2]_1 - 4p'[1^1/2]_2$
706,72175	11,55	13,30	$4s[1^1/2]_2 - 4p'[1^1/2]_2$
696,54304	11,55	13,33	$4s[1^1/2]_2 - 4p'[1^1/2]_1$
666,40533	13,09	14,95	$4p[2^1/2]_1 - 4d'[1^1/2]_2$
614,54432	13,30	15,32	$4p'[1^1/2]_2 - 5d'[2^1/2]_{2,3}$
591,20861	12,91	15,00	$4p[1^1/2]_1 - 4d'[1^1/2]_1$
573,95207	13,15	15,31	$4p[1^1/2]_1 - 5d'[2^1/2]_2$
565,07054	12,91	15,10	$4p[1^1/2]_1 - 5d[1^1/2]_0$
549,5876	13,08	15,33	$4p[2^1/2]_3 - 6d[3^1/2]_4$
518,77507	12,91	15,30	$4p[1^1/2]_1 - 5d'[1^1/2]_1$
470,23155	11,83	14,46	$4s'[1^1/2]_1 - 5p[1^1/2]_1$
462,84409	11,83	14,51	$4s'[1^1/2]_1 - 5p[2^1/2]_2$
459,60964	11,83	14,52	$4s'[1^1/2]_1 - 5p[1^1/2]_1$
452,23238	11,72	14,46	$4s'[1^1/2]_0 - 5p[1^1/2]_1$
451,07335	11,83	14,58	$4s'[1^1/2]_1 - 5p[1^1/2]_0$
434,5167	11,83	14,66	$4s'[1^1/2]_1 - 5p'[1^1/2]_1$
433,53381	11,83	14,69	$4s'[1^1/2]_1 - 5p'[1^1/2]_1$
433,35612	11,83	14,69	$4s'[1^1/2]_1 - 5p'[1^1/2]_2$
430,01011	11,62	14,51	$4s[1^1/2]_1 - 5p[2^1/2]_2$
427,21690	11,62	14,52	$4s[1^1/2]_1 - 5p[1^1/2]_1$
426,62868	11,62	14,53	$4s[1^1/2]_1 - 5p[1^1/2]_2$
425,93617	11,83	14,74	$4s'[1^1/2]_1 - 5p'[1^1/2]_0$
425,11850	11,55	14,46	$4s[1^1/2]_2 - 5p[1^1/2]_1$
420,06746	11,55	14,50	$4s[1^1/2]_2 - 5p[2^1/2]_{2,3}$
419,83176	11,62	14,58	$4s[1^1/2]_1 - 5p[1^1/2]_0$
419,10288	11,72	14,66	$4s'[1^1/2]_0 - 5p'[1^1/2]_1$
418,18837	11,72	14,69	$4s'[1^1/2]_0 - 5p'[1^1/2]_1$
416,41795	11,55	14,52	$4s[1^1/2]_2 - 5p[1^1/2]_2$
415,85906	11,55	14,53	$4s[1^1/2]_2 - 5p[1^1/2]_2$
404,44185	11,62	14,69	$4s[1^1/2]_1 - 5p'[1^1/2]_2$
394,89785	11,55	14,69	$4s[1^1/2]_2 - 5p'[1^1/2]_1$
394,75048	11,55	14,69	$4s[1^1/2]_2 - 5p'[1^1/2]_2$
383,46788	11,83	15,06	$4s'[1^1/2]_1 - 6p[1^1/2]_0$
346,98330	11,83	15,22	$4s'[1^1/2]_1 - 6p'[1^1/2]_0$

λ , нм	E_H , эВ	E_B , эВ	Переход
360,65224	11,62	15,06	$4s[1^1/2]_1 - 6p[1^1/2]_0$
346,10785	11,62	15,20	$4s[1^1/2]_1 - 6p'[1^1/2]_2$
337,34823	11,62	15,30	$4s[1^1/2]_1 - 7p[1^1/2]_0$
331,93446	11,55	15,28	$4s[1^1/2]_2 - 7p[1^1/2]_2$
317,2961	11,55	15,45	$4s[1^1/2]_2 - 7p'[1^1/2]_1$
106,6660	0,00	11,62	$3p^6 1S_0 - 4s[1^1/2]_1$
104,8218	0,00	11,83	$3p^6 1S_0 - 4s'[1^1/2]_1$
89,4310	0,00	13,86	$3p^6 1S_0 - 3d[1^1/2]_1$
87,9949	0,00	14,09	$3p^6 1S_0 - 5s[1^1/2]_1$
87,6063	0,00	14,15	$3p^6 1S_0 - 3d[1^1/2]_1$
86,6805	0,00	14,30	$3p^6 1S_0 - 3d'[1^1/2]_1$
83,5003	0,00	14,85	$3p^6 1S_0 - 6s[1^1/2]_1$
83,4397	0,00	14,86	$3p^6 1S_0 - 4d[1^1/2]_1$
81,6466	0,00	15,18	$3p^6 1S_0 - 7s[1^1/2]_1$
81,6233	0,00	15,19	$3p^6 1S_0 - 5d[1^1/2]_1$

Таблица 32.6
Спектральные линии Кг I [5]

λ , нм	E_H , эВ	E_B , эВ	Переход
2190,051	11,55	12,11	$5p[1^1/2]_2 - 4d[1^1/2]_2$
1816,712	11,44	12,12	$5p[2^1/2]_3 - 4d[3^1/2]_4$
1693,571	11,53	12,26	$5p[1^1/2]_1 - 4d[2^1/2]_2$
1689,658	11,30	12,04	$5p[1^1/2]_1 - 4d[1^1/2]_1$
1689,040	11,44	12,18	$5p[2^1/2]_2 - 4d[3^1/2]_3$
1678,465	11,55	12,28	$5p[1^1/2]_2 - 4d[2^1/2]_{2,3}$
1533,529	11,30	12,11	$5p[1^1/2]_1 - 4d[1^1/2]_2$
1523,985	11,44	12,26	$5p[2^1/2]_2 - 4d[2^1/2]_2$
1473,446	11,44	12,28	$5p[2^1/2]_3 - 4d[2^1/2]_{2,3}$
1442,693	11,53	12,38	$5p[1^1/2]_1 - 6s[1^1/2]_1$
1363,422	11,44	12,35	$5p[2^1/2]_2 - 6s[1^1/2]_1$
1362,228	11,44	12,35	$5p[2^1/2]_2 - 4d[1^1/2]_1$
1317,738	11,44	12,38	$5p[2^1/2]_2 - 6s[1^1/2]_1$
1287,900	12,18	13,14	$4d[3^1/2]_3 - 4f[4^1/2]_4$
1220,439	12,12	13,14	$4d[3^1/2]_4 - 4f[4^1/2]_5$
1181,943	11,30	12,35	$5p[1^1/2]_1 - 6s[1^1/2]_2$
985,624	11,55	12,80	$5p[1^1/2]_2 - 4d'[1^1/2]_2$
975,1759	10,03	11,30	$5s[1^1/2]_1 - 5p[1^1/2]_1$
992,86920	9,91	11,30	$5s[1^1/2]_2 - 5p[1^1/2]_1$
877,67490	10,03	11,44	$5s[1^1/2]_1 - 5p[2^1/2]_2$
850,88700	10,64	12,10	$5s'[1^1/2]_1 - 5p'[1^1/2]_1$
829,81077	10,03	11,53	$5s[1^1/2]_1 - 5p[1^1/2]_1$
828,10495	10,64	12,14	$5s'[1^1/2]_1 - 5p'[1^1/2]_1$
826,32398	10,64	12,14	$5s'[1^1/2]_1 - 5p'[1^1/2]_2$
819,00543	10,03	11,55	$5s[1^1/2]_1 - 5p[1^1/2]_2$
811,2900	9,91	11,44	$5s[1^1/2]_2 - 5p[2^1/2]_{2,3}$
810,43642	9,91	11,44	$5s[1^1/2]_2 - 5p[2^1/2]_2$
810,402	11,44	12,97	$5p[2^1/2]_3 - 5d[3^1/2]_4$
805,95038	10,56	12,10	$5s'[1^1/2]_0 - 5p'[1^1/2]_{1,1}$
785,48215	10,56	12,14	$5s'[1^1/2]_0 - 5p'[1^1/2]_1$
769,45393	9,91	11,53	$5s[1^1/2]_2 - 5p[1^1/2]_1$
760,15443	9,91	11,55	$5s[1^1/2]_2 - 5p[1^1/2]_2$
758,74130	10,03	11,67	$5s[1^1/2]_1 - 5p[1^1/2]_0$
645,62910	11,44	13,36	$5p[2^1/2]_3 - 6d[3^1/2]_4$
642,10283*	11,44	13,37	$5p[2^1/2]_2 - 6d[3^1/2]_3$
605,61280	11,30	13,35	$5p[1^1/2]_1 - 6d[1^1/2]_1$
599,38506*	10,03	12,10	$5s[1^1/2]_1 - 5p'[1^1/2]_1$
587,09153*	10,03	12,14	$5s[1^1/2]_1 - 5p'[1^1/2]_2$
583,28600	11,44	13,57	$5p[2^1/2]_3 - 7d[3^1/2]_4$
564,95625*	10,56	12,76	$5s'[1^1/2]_0 - 6p[1^1/2]_1$
557,02890*	9,91	12,14	$5s[1^1/2]_2 - 5p'[1^1/2]_1$
556,22254	9,91	12,14	$5s[1^1/2]_2 - 5p'[1^1/2]_2$

Продолжение табл. 32.6

λ , нм	E_H , эВ	E_V , эВ	Переход
450,23546*	10,03	12,78	$5s[1^1/2]_1 - 6p[2^1/2]_2$
446,36901*	10,03	12,81	$5s[1^1/2]_1 - 6p[1^1/2]_1$
445,59177*	10,03	12,82	$5s[1^1/2]_1 - 6p[1^1/2]_2$
442,31908	10,64	13,44	$5s'[1^1/2]_1 - 6p'[1^1/2]_1$
439,99670*	10,64	13,46	$5s'[1^1/2]_1 - 6p'[1^1/2]_2$
437,61219*	10,03	12,86	$5s[1^1/2]_1 - 6p[1^1/2]_0$
436,26424*	9,91	12,76	$5s[1^1/2]_2 - 6p[1^1/2]_1$
435,13602*	10,64	13,49	$5s'[1^1/2]_1 - 6p'[1^1/2]_0$
431,95798*	9,91	12,78	$5s[1^1/2]_2 - 6p[2^1/2]_3$
431,85523*	9,91	12,78	$5s[1^1/2]_2 - 6p[2^1/2]_2$
428,29686	9,91	12,81	$5s[1^1/2]_2 - 6p[1^1/2]_1$
427,39700	9,91	12,82	$5s[1^1/2]_2 - 6p[1^1/2]_2$
377,34241	10,03	13,32	$5s[1^1/2]_1 - 7p[1^1/2]_0$
343,17217	9,91	13,53	$5s[1^1/2]_2 - 8p[2^1/2]_3$
123,5839	0,00	10,03	$4p^6 1S_0 - 5s[1^1/2]_1$
116,4868	0,00	10,64	$4p^6 1S_0 - 5s'[1^1/2]_1$
103,0020	0,00	12,04	$4p^6 1S_0 - 4d[1^1/2]_1$
100,3542	0,00	12,35	$4p^6 1S_0 - 4d[1^1/2]_1$
100,1048	0,00	12,38	$4p^6 1S_0 - 6s[1^1/2]_1$
96,334	0,00	12,87	$4p^6 1S_0 - 5d[1^1/2]_1$
95,342	0,00	13,00	$4p^6 1S_0 - 4d'[1^1/2]_1$
94,652	0,00	13,10	$4p^6 1S_0 - 5d[1^1/2]_1$

Таблица 32.7

Спектральные линии Хе I [5]

λ , нм	E_H , эВ	E_V , эВ	Переход
1262,332	9,58	10,56	$6p[1^1/2]_1 - 7s[1^1/2]_2$
1108,525	10,16	11,27	$5d[2^1/2]_2 - 4f[3^1/2]_3$
1083,834	8,44	9,58	$6s[1^1/2]_1 - 6p[1^1/2]_1$
992,3192	8,44	9,69	$6s[1^1/2]_1 - 6p[2^1/2]_2$
979,9699	8,31	9,58	$6s[1^1/2]_2 - 6p[1^1/2]_1$
916,2654	8,44	9,79	$6s[1^1/2]_1 - 6p[1^1/2]_1$
904,5446	8,31	9,69	$6s[1^1/2]_2 - 6p[2^1/2]_2$
895,2254	8,44	9,82	$6s[1^1/2]_2 - 6p[1^1/2]_2$
886,232	9,58	10,98	$6p[1^1/2]_1 - 5d[1^1/2]_1$
881,9412	8,31	9,72	$6s[1^1/2]_2 - 6p[2^1/2]_3$
873,939	9,58	11,00	$6p[1^1/2]_1 - 6d[1^1/2]_2$
864,854	9,57	11,00	$6s'[1^1/2]_1 - 7p[1^1/2]_1$
840,9190	8,31	9,79	$6s[1^1/2]_2 - 6p[1^1/2]_1$
834,6823	9,57	11,05	$6s'[1^1/2]_1 - 6p'[1^1/2]_2$
828,01163	8,44	9,93	$6s[1^1/2]_1 - 6p[1^1/2]_0$
826,6519	9,57	11,07	$6s'[1^1/2]_1 - 6p'[1^1/2]_1$
823,16348	8,31	9,82	$6s[1^1/2]_2 - 6p[1^1/2]_2$
820,6341	9,45	10,96	$6s'[1^1/2]_0 - 6p'[1^1/2]_1$
796,7341	9,45	11,00	$6s'[1^1/2]_0 - 7p[1^1/2]_1$
788,7395	9,57	11,14	$6s'[1^1/2]_1 - 6p'[1^1/2]_0$
764,2025	9,45	11,07	$6s'[1^1/2]_0 - 6p'[1^1/2]_1$
711,9598	9,72	11,46	$6p[2^1/2]_3 - 7d[3^1/2]_4$
688,2155	9,69	11,49	$6p[2^1/2]_2 - 7d[3^1/2]_3$
646,9705	9,58	11,50	$6p[1^1/2]_1 - 7d[1^1/2]_2$
631,8062	9,72	11,68	$6p[2^1/2]_3 - 8d[3^1/2]_4$
618,2420	9,69	11,69	$6p[2^1/2]_2 - 8d[3^1/2]_3$
582,3890	9,45	11,57	$6s'[1^1/2]_0 - 5f[1^1/2]_1$
492,31522	8,44	10,95	$6s[1^1/2]_1 - 7p[2^1/2]_2$
491,6508	8,44	10,96	$6s[1^1/2]_1 - 6p'[1^1/2]_1$
484,3294	8,44	10,99	$6s[1^1/2]_1 - 7p[1^1/2]_1$
482,9709	8,44	11,00	$6s[1^1/2]_1 - 7p[1^1/2]_1$
480,7019	8,44	11,01	$6s[1^1/2]_1 - 7p[1^1/2]_0$
473,41524	8,44	11,05	$6s[1^1/2]_1 - 6p'[1^1/2]_2$
469,7020	8,31	10,95	$6s[1^1/2]_2 - 7p[2^1/2]_2$
467,1226	8,31	10,97	$6s[1^1/2]_2 - 7p[2^1/2]_3$

Продолжение табл. 32.7

λ , нм	E_H , эВ	E_V , эВ	Переход
462,42757	8,31	10,99	$6s[1^1/2]_2 - 7p[1^1/2]_2$
458,27474	8,44	11,14	$5s[1^1/2]_1 - 6p'[1^1/2]_0$
452,46805	8,31	11,05	$6s[1^1/2]_2 - 6p'[1^1/2]_2$
450,09772	8,31	11,07	$6s[1^1/2]_2 - 6p'[1^1/2]_1$
438,39092	8,44	11,26	$6s[1^1/2]_1 - 4f[1^1/2]_2$
419,35296	8,31	11,27	$6s[1^1/2]_2 - 4f[2^1/2]_3$
407,88207	8,44	11,47	$6s[1^1/2]_1 - 8p[1^1/2]_0$
146,9610	0,00	8,44	$5p^6 1S_0 - 6s[1^1/2]_1$
129,5587	0,00	9,57	$5p^6 1S_0 - 4s'[1^1/2]_1$
125,0203	0,00	9,92	$5p^6 1S_0 - 5d[1^1/2]_1$
119,2040	0,00	10,40	$5p^6 1S_0 - 5d[1^1/2]_1$

Таблица 32.8

Резонансные линии ионов изоэлектронного ряда водорода [8, 9] и гелия [9, 10]

Атом, ион	λ , нм	Атом, ион	λ , нм
H I	121,567	He I	58,433
He II	30,378	Li II	19,928
Li III	13,500	Be III	10,025
Be IV	7,593	B IV	6,031
B V	4,859	C V	4,028
C VI	3,374	N VI	2,879
N VII	2,478	O VII	2,160
O VIII	1,897	F VIII	1,681
F IX	1,498	Ne IX	1,344
Ne X	1,213	Mg XI	0,9168
Na XI	1,002	Al XII	0,7757
Mg XII	0,8421	S XV	0,5038
Al XIII	0,7173	Ca XIX	0,3177
Si XIV	0,6182	Fe XXV	0,1850
S XVI	0,4729		

32.5 Стандарты длин волн

Решением XI Генеральной конференции по мерам и весам 1960 г. в качестве первичного эталона длины принята длина волны (в вакууме) оранжевой линии чистого изотопа криптона ^{86}Kr , соответствующей переходу $2p_{10} - 5d_5$, $\lambda_{\text{Kr}} = 605,6$ нм. В соответствии с этим международная единица длины метр определяется как величина, точно равная $1\,650\,763,73 \lambda_{\text{Kr}}$. Первичный эталон длин волн идентичен первичному эталону длины и 1 ангстрем точно равен 10^{-10} м.

Первичный эталон длин волн в вакууме и воздухе равен соответственно $\lambda_{\text{вак}} = 605,780211$ нм, $\lambda_{\text{возд}} = 605,612525$ нм.

Установлены стандартные условия возбуждения криптона: а) чистота изотопа ^{86}Kr должна быть не ниже 99%; б) температура самой холодной точки лампы должна быть не выше тройной точки азота, т. е. 63°K , и в соответствии с этим давление криптона должно быть $0,03$ мм рт. ст. или ниже; в) плотность тока в лампе должна быть не выше 4 ма/мм². При этих условиях смещение линии криптона меньше, чем $\pm 0,001$ нм, по отношению к величине принятого первичного стандарта.

Дальнейшая классификация стандартов длин волн: выделяется сравнительно небольшая группа линий класса А, длины волн которых воспроизводятся с высокой точностью. Они могут заменить первичный стандарт и тем облегчить интерферометрические измерения

Стандартные длины волн Fe I ($\lambda_{\text{возд}}$) [7, 11]
Интенсивности линий I взяты из работы [5]

$\lambda, \text{нм}$	I	$\lambda, \text{нм}$	I	$\lambda, \text{нм}$	I	$\lambda, \text{нм}$	I
1197,3067	8	710,7462	—	613,7000	—	516,74905	40
1188,4097	—	706,8413	40	613,6621	20	516,62841	4
1188,2861	7	702,4068	10	606,5488	15	515,19143	—
1178,3275	6	701,6062	60	602,7057	—	515,08425	6
1168,9988	8	698,8531	—	595,6697	—	514,29320	6
1163,8279	7	697,8856	100	591,6252	—	514,17424	—
1160,7587	—	694,5208	150	570,93864	10	513,94702	20
1159,3600	5	683,9837	—	570,15511	7	513,92578	10
1143,9129	15	680,6851	10	565,88247	10	513,14734	—
1142,2335	6	675,0155	100	562,45501	10	512,73624	5
1137,4095	—	670,3574	10	561,56521	50	512,37231	6
1111,9809	10	667,7994	600	561,53039	—	511,04139	10
1039,5811	8	666,3444	80	560,29529	10	510,76439	—
1034,0898	—	660,9117	30	558,67634	40	510,74505	6
937,2904	6	659,3875	60	557,28501	30	509,87030	8
936,2371	—	659,2920	300	556,96256	20	508,33413	7
935,9419	—	657,5024	30	550,67824	18	507,97426	—
921,0033	6	657,4231	—	550,14686	12	507,92279	—
914,6138	—	654,6245	200	549,75196	15	506,87730	10
911,8892	25	651,8374	20	545,56131	40	505,16379	10
908,9415	30	649,8943	5	544,69197	40	504,98253	15
908,8324	50	649,4985	1000	543,45268	30	504,17585	10
899,9564	200	648,1877	20	542,96999	40	504,10747	7
897,5410	10	647,5632	12	540,57781	40	502,81331	4
894,3078	—	646,2730	30	539,71311	40	501,20712	12
886,8442	—	643,0852	300	539,31752	10	500,61254	20
883,8434	30	642,1355	200	537,14926	50	500,27998	6
882,4227	250	641,1659	400	536,54062	—	499,41323	8
880,4637	10	640,8028	60	534,10255	20	498,55539	7
875,7192	25	640,0321	—	533,99371	12	496,60968	8
868,8632	1500	640,0013	800	533,29020	—	495,76059	60
867,4753	60	639,3605	400	532,85336	15	495,73054	20
866,1907	600	638,0746	—	532,80418	50	495,01144	—
862,1613	10	635,8696	—	532,41864	30	494,63944	—
861,1807	40	635,5035	—	532,20456	—	493,96896	4
858,2268	15	634,4154	—	530,73633	5	493,88206	10
851,5122	20	633,6833	—	530,23073	10	492,47753	3
851,4079	150	633,5337	10	528,36283	18	492,05096	60
846,8414	300	632,2691	—	528,17970	10	491,90003	30
838,7780	1200	631,8023	10	527,31708	—	491,00253	2
836,5642	25	630,1510	15	527,03602	30	490,33169	12
832,7063	1200	629,7798	—	526,95402	60	489,14989	50
829,3523	20	628,0621	—	526,65626	30	489,07616	25
823,9130	8	626,5140	—	526,33134	8	487,82182	12
809,6881	—	625,6367	—	525,06490	6	487,21444	20
807,5156	—	625,4263	6	524,24955	5	487,13244	25
804,7621	15	625,2561	20	523,29474	40	485,97480	15
791,2867	6	624,6329	15	522,71911	40	485,56812	—
774,8278	125	624,0649	—	522,68686	15	484,40158	—
772,3213	—	623,2650	—	521,73964	5	483,95510	—
766,4301	80	623,0728	25	521,62770	10	478,96537	7
758,3797	50	621,9286	—	521,51871	6	478,87606	—
744,3019	—	621,3435	—	520,86007	7	478,68106	5
741,8673	—	620,0319	—	520,45840	5	477,17008	—
740,1690	—	619,1563	20	520,23395	8	474,15321	—
728,4842	—	617,3341	—	519,87149	—	474,03434	—
722,3668	12	616,5364	—	519,49441	10	473,67807	12
721,9686	—	615,7732	—	519,23509	30	473,35955	—
720,7116	500	615,1623	—	519,14615	20	471,02864	—
713,2990	—	614,1741	—	517,15987	20	470,74908	—
711,2177	—	613,7697	18	516,89003	—	470,72807	8

λ , нм	I	λ , нм	I	λ , нм	I	λ , нм	I
469,14144	6	432,67555	—	412,18050	5	391,36339	4
468,35640	—	432,57647	35	412,02087	—	391,08461	—
468,02983	—	431,50872	10	411,85484	15	390,79371	4
466,81422	6	430,93771	4	411,44485	—	390,64814	8
466,19726	—	430,79048	35	410,98053	9	390,39011	5
465,45020	—	430,54545	—	410,74917	12	390,29484	20
464,74370	6	430,45436	—	410,07389	—	389,97086	30
463,29149	—	430,21882	—	409,59731	—	389,80111	10
463,01248	—	429,92409	18	409,15565	—	389,74515	—
462,50527	3	429,80403	3	407,98411	—	389,56579	25
461,87604	—	429,41271	15	407,83563	—	389,39141	—
460,29446	9	428,81484	—	407,47889	—	389,33935	7
460,20040	—	428,54453	3	407,17399	40	388,85165	20
459,53627	—	428,24057	12	406,72738	—	388,70504	—
459,26547	5	427,17634	35	406,35963	45	388,62839	40
457,47225	—	427,11589	20	406,24440	10	388,55121	5
454,78505	4	426,69675	—	405,87562	—	388,43609	—
454,70206	—	426,04794	35	405,73456	—	387,85745	100
453,11520	8	425,83174	—	405,50376	—	387,80206	60
452,86175	18	425,07896	25	404,58147	60	387,60414	—
451,75289	—	425,01248	25	404,46125	6	387,37624	8
451,41876	—	424,82275	4	403,26294	—	387,25032	60
449,45669	12	424,52594	6	403,01855	—	387,17513	4
449,00872	—	423,59433	25	402,18696	12	386,95615	4
448,97416	3	423,36089	18	401,71524	6	386,72184	7
448,22563	6	422,97561	—	400,97154	10	386,55256	30
448,21720	4	422,64263	—	400,72735	6	385,99132	300
448,01397	—	422,22181	12	400,52440	25	385,92143	10
447,60206	10	421,93641	12	400,16627	—	385,63731	50
446,65542	12	421,61854	8	400,04598	—	385,25752	6
446,47691	—	421,03497	15	399,80554	10	385,08193	12
446,16544	8	420,71298	—	399,73952	15	384,99694	40
445,91213	10	420,66985	3	399,59861	—	384,68023	8
445,63294	—	420,39867	10	399,41166	—	384,51706	5
445,43835	5	420,20320	30	399,03766	—	384,32596	8
444,77212	9	419,90981	20	398,39593	10	384,10499	80
444,31963	7	419,83098	20	398,17743	7	384,04397	80
444,23428	12	419,56205	—	397,77437	12	383,92584	7
443,98849	—	419,14358	15	397,13250	9	383,71370	—
443,69246	—	418,78015	20	396,92595	30	383,42244	100
443,51500	—	418,70436	20	396,74234	8	383,33103	5
443,25729	—	418,48941	10	396,60645	10	383,08638	—
443,06175	6	418,23846	—	396,45173	—	383,07607	—
442,73118	10	418,17571	15	395,66796	12	382,97637	—
442,25703	6	417,75949	4	395,64574	9	382,78256	75
441,51250	20	417,56386	10	395,31548	—	382,75746	—
440,84176	6	417,49137	5	395,26045	8	382,58834	200
440,77130	5	417,39230	—	394,99558	10	382,44455	50
440,47525	30	417,33178	—	394,87778	10	382,40763	—
440,14456	—	417,27454	—	394,48924	—	382,18357	—
439,09542	4	417,09044	—	394,33414	—	382,11807	10
438,92467	—	415,68021	12	394,24418	6	382,04274	250
438,78959	4	415,45021	12	394,08797	5	381,63421	—
438,35473	45	415,21704	—	393,73310	—	381,58430	100
437,59318	9	414,76719	10	393,58143	8	381,45247	—
436,97745	7	414,38703	30	393,02981	25	381,29658	40
436,79059	—	414,34174	15	392,79216	30	380,87306	4
436,75811	5	413,99288	—	392,56460	—	380,75392	7
435,85037	—	413,46798	12	392,29134	25	380,66992	10
435,27371	9	413,29024	8	392,02601	20	380,53450	12
435,15465	—	413,20603	25	391,90681	—	380,16317	—
434,89398	—	412,76113	7	391,83174	—	379,95498	50
434,65571	—	412,58831	—	391,71834	8	379,85134	40
433,70484	10						

λ , нм	I	λ , нм	I	λ , нм	I	λ , нм	I
379,79502	12	360,88609	100	338,39808	8	309,98968	20
379,50045	60	360,66821	20	338,24042	—	309,38063	—
379,00943	12	360,32068	10	338,01117	8	309,15786	20
378,91783	—	358,91063	8	337,90206	6	308,37430	20
378,78825	50	358,69861	30	337,20744	—	307,57214	25
378,66781	8	358,57068	20	337,07852	10	306,81749	8
377,86986	—	358,53206	30	335,94876	—	306,72457	30
377,74521	—	358,46627	8	335,64030	—	306,71196	8
377,64553	6	358,16499	—	335,52287	6	306,09849	—
377,48266	5	357,12265	—	335,17457	—	305,90871	100
376,71939	80	357,00996	100	335,15239	—	305,74471	40
376,55414	20	356,89778	—	334,79271	6	305,52638	12
376,37910	100	356,53807	60	334,22163	—	304,76060	100
376,14103	—	355,85170	30	334,05666	6	304,26667	15
376,05335	6	355,41196	—	333,76664	6	304,20215	15
375,82350	150	354,07111	—	333,57699	4	304,17401	15
375,36134	8	352,64695	—	333,42201	4	304,16386	10
374,94875	200	352,61676	15	333,16133	4	304,04281	15
374,82639	60	352,60415	—	332,88667	5	303,77809	—
374,59013	40	352,42417	—	332,74970	—	303,73901	80
374,55623	100	352,12630	25	332,45385	4	303,01494	15
374,33640	20	351,38196	30	332,37375	7	302,92351	—
373,83078	10	350,65004	—	331,47420	7	302,64637	15
373,71333	150	350,48636	—	330,59719	20	302,58442	50
373,48659	300	350,05675	—	329,81331	6	302,40337	15
373,33191	40	349,78420	40	329,25910	6	302,10743	150
373,13761	—	349,52879	8	329,09899	5	302,06405	200
373,03884	—	349,05749	100	328,67541	20	302,04918	100
372,86696	—	348,53418	7	328,45888	5	301,89848	15
372,76211	50	348,30090	—	328,02613	8	301,76288	15
372,43796	8	347,67036	40	327,64713	4	301,41747	—
372,25642	50	347,54511	70	327,16842	—	300,95707	25
372,20263	—	347,13460	6	327,10014	15	300,90945	—
371,99367	250	347,12672	—	326,56182	15	300,81399	60
371,84092	—	346,88474	—	326,50473	8	300,72832	—
371,59136	—	346,65001	—	326,33697	—	300,71469	8
371,12243	—	346,58621	60	325,75940	8	300,30323	10
370,92484	75	346,33044	—	325,43628	10	300,09489	100
370,79216	8	346,23539	—	325,29160	—	300,04527	8
370,78231	20	345,22760	10	325,06250	—	299,95125	30
370,55674	100	345,19166	10	324,64816	—	299,63864	—
370,44635	10	345,03304	10	324,60054	8	299,45033	—
368,74589	40	344,72797	8	323,62231	8	299,44281	100
368,70982	—	344,51508	20	323,46138	7	299,03933	6
368,41102	15	344,38775	50	322,91221	—	298,84730	—
368,30562	10	344,26709	—	322,67137	—	298,72923	10
367,99152	40	344,09899	75	321,43964	8	298,64569	3
367,88620	3	344,06069	150	320,07854	—	298,35714	125
367,76309	12	342,81948	8	319,32268	10	298,14459	20
367,63135	6	342,71213	20	319,16599	7	297,32368	60
366,95229	10	342,42861	10	318,48955	7	297,31336	60
365,95188	8	342,26583	7	318,29798	4	296,94759	10
365,54671	—	341,78428	12	318,07562	5	296,93606	5
365,14699	20	341,55318	—	316,13728	—	296,68997	125
365,02811	—	341,31339	15	314,84078	—	296,52561	20
364,95090	12	340,74611	20	314,32434	—	295,99929	10
364,93042	—	340,68021	6	314,28908	—	295,73660	30
364,78439	100	340,43557	6	313,41115	10	295,46543	5
364,03918	15	340,15200	6	312,93349	5	295,39411	50
363,82998	12	339,93356	15	312,04364	6	294,78773	60
363,29799	—	339,76403	—	311,94956	6	294,13438	15
363,14646	125	339,69774	4	311,66337	12	293,69049	60
362,31878	8	339,45854	5	310,06667	20	292,96195	—
362,14640	15	339,26540	15	310,03054	20	292,90085	25
361,87694	125	339,23058	8	309,99695	15	292,59012	—

λ, нм	i	λ, нм	i	λ, нм	i	λ, нм	i
292,06915	5	275,73170	10	258,04542	—	229,38482	25
291,43055	—	275,63295	20	258,00662	—	229,25249	30
291,22582	—	275,62677	20	257,66916	—	229,16274	15
291,21589	20	275,44273	—	256,45609	—	228,72505	30
290,13820	5	275,40332	—	256,18562	—	228,40864	40
289,50362	8	275,01415	25	256,05576	—	228,36557	12
289,45055	10	274,75564	—	255,63043	—	228,33045	9
289,38822	—	274,45287	8	255,28318	—	227,60263	12
288,63174	—	274,40691	10	254,96142	10	227,20703	15
288,05806	—	274,24064	30	254,59795	10	227,08628	18
287,73021	8	274,22554	20	254,09734	10	226,90990	18
287,53034	5	274,20164	—	253,93576	7	226,70853	9
287,41733	10	274,15781	—	253,74598	—	226,50546	20
287,23346	7	273,82143	—	253,56086	8	225,95109	15
286,93083	10	273,73108	20	253,28764	—	225,18749	12
286,75632	—	273,54762	8	252,98370	—	225,07911	10
286,66264	7	273,46165	—	252,91361	10	224,56536	15
286,38644	8	273,42691	—	252,74358	15	224,25725	15
286,34311	8	273,40060	—	252,42939	8	223,12138	15
286,24952	—	273,35816	15	252,28505	40	222,90735	55
285,88970	5	273,09822	—	252,19197	7	222,81722	10
285,36855	—	272,89703	—	251,96305	10	221,12364	7
285,17979	15	272,80212	5	251,81029	12	221,06894	9
284,87153	—	272,56021	—	251,65716	—	220,70692	6
284,68312	—	272,49542	10	251,08362	15	219,60427	50
284,55959	8	272,35786	15	250,16946	—	219,12052	10
284,39775	20	272,09035	40	250,11332	20	218,71950	40
284,36314	10	271,84365	6	249,65343	6	218,68933	—
284,09382	—	271,77874	—	249,42525	—	218,08692	—
284,04229	6	271,48697	—	249,11562	20	217,68414	6
283,81205	10	271,16560	4	249,06454	30	217,32146	8
283,59511	—	270,65829	—	248,81437	40	217,25858	6
283,54574	6	269,91075	6	248,73705	—	217,12976	40
283,24364	25	269,70224	—	248,32718	60	216,45495	7
282,88094	7	269,50357	—	247,97774	20	216,38633	6
282,78931	5	269,22496	—	247,94813	6	216,15802	5
282,56888	6	269,00694	—	247,48151	8	215,96583	—
282,55569	20	268,98305	—	247,28962	5	215,89207	—
282,32767	20	268,92130	8	246,88803	—	215,77951	5
282,08039	—	268,04540	—	246,77330	—	215,50203	—
281,75047	6	267,90626	10	246,51500	6	215,30075	5
281,32877	30	267,32142	—	246,26483	10	215,01850	—
280,83281	—	266,79138	—	246,21822	—	214,51901	—
280,72461	—	266,69665	—	245,75980	6	214,17188	—
280,69852	—	266,68133	8	245,34767	—	214,10872	—
280,45212	20	266,63998	—	244,77108	—	213,96987	—
280,31675	—	266,20574	—	244,52134	6	213,85932	—
279,77765	15	265,67933	—	244,38728	20	213,20177	—
279,68721	—	265,17075	—	243,81831	—	212,62108	—
279,55409	—	264,75588	5	238,99732	25	211,51697	20
279,50065	—	264,54230	—	238,18356	—	211,46003	—
279,47033	—	264,39992	—	237,45192	10	211,29696	25
279,17867	—	264,16468	4	237,36250	20	210,89598	30
278,79331	5	263,64794	—	237,14313	15	210,83027	12
278,18368	—	263,58100	8	236,94567	8	210,81371	12
277,82214	20	263,25951	—	232,96413	—	210,63953	25
277,21107	20	263,22382	4	232,03585	40	210,30534	25
277,20748	—	262,33669	—	231,31048	40	210,23542	30
276,96717	—	261,87111	—	230,89999	30	210,07984	30
276,92985	—	261,80191	5	230,35815	20	210,01464	10
276,75232	20	261,44952	—	230,16849	20	209,36853	40
276,69104	—	261,27734	—	229,92209	25	209,03837	30
276,27732	—	260,68280	6	229,81699	10	208,75115	25
276,20275	15	260,56578	6	229,77877	35	208,41218	50
276,17810	18	258,45370	8	229,69279	15		

в различных областях спектра. К классу *A* отнесен ряд линий благородных газов [3, 11] (см. разд. 32.3). Резкие линии ^{198}Hg с успехом могут быть использованы в качестве стандартов длин волн. Рекомендуются [1] следующие яркие линии ^{198}Hg : 365,01569; 404,65715; 407,78379; 435,83376; 546,07532; 576,95984; 579,06627 нм.

Стандарты второго типа, или линии класса *B*, получают интерполяцией в спектрах, даваемых призменными или дифракционными спектрографами. Для них достаточно погрешность $\pm 0,01$ нм, но налагается дополнительное требование, чтобы близлежащие линии не слиш-

ком различались по интенсивности. К линиям класса *B* отнесены линии железа, возбуждаемые в дуге в воздухе (табл. 32.9).

В тех областях спектра, где интерферометрические измерения невозможны, пользуются комбинационным принципом Ритца; по линиям, длины волн которых измерены интерферометрически с хорошей точностью, определяют относительные энергии уровней, и комбинации между этими уровнями дают так называемые стандарты Ритца в вакуумной, ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра.

Таблица 32.10

Параметры двухатомных молекул [12]

За единицу массы молекул *M* принята масса протона.

Молекула	<i>M</i>	Электронное состояние	$E_{эл}, \text{ см}^{-1}$	$\tilde{\nu}_e, \text{ см}^{-1}$	$\tilde{\nu}_e x_e, \text{ см}^{-1}$	$B_e, \text{ см}^{-1}$	$\alpha_e, \text{ см}^{-1}$	$r_e, \text{ нм}$
$\text{Br}^{79}\text{Br}^{81}$	39,958	$X^1\Sigma_g^+$	0	323,2	1,07	0,0809	$2,75 \cdot 10^{-4}$	0,2284
		$B^2\Pi_{0u}^+$	15891	169,7	1,91	0,0595	$6,25 \cdot 10^{-4}$	0,266
Cl_2	17,489	$X^1\Sigma_g^+$	0	564,9	4,0	0,244	$1,7 \cdot 10^{-3}$	0,1988
		$A^3\Pi_{0u}^+$	18310	239,4	5,42	0,158	$3 \cdot 10^{-3}$	0,247
CO	6,858	$X\Sigma^+$	0	2170	13,46	1,931	0,0175	0,1128
		$A\Pi$	65075	1516	17,25	1,612	0,0223	0,1235
CO^+	6,858	$X^2\Sigma^+$	0	2214	15,16	1,977	0,0190	0,1115
		$A^2\Pi$	20734	1562	13,53	1,589	0,0194	0,1244
		$B^2\Sigma^+$	45877	1734	27,93	1,800	0,0302	0,1169
H_2	0,5041	$X^1\Sigma_g^+$	0	4395	118	60,81	2,99	0,07417
		$B^3\Sigma_u^+$	91690	1357	19,9	20,02	1,19	0,1293
		$C\Pi_u$	100043	2443	67,0	31,34	1,63	0,1033
		$E\Sigma_g^+$	100062	2589	130	32,68	1,82	0,1012
		$C^3\Pi_u$	95744	2465	61,4	31,07	1,42	0,1038
		$a^3\Sigma_g^+$	95938	2665	71,6	34,22	1,67	0,0989
		$e^3\Sigma_u^+$	107777	2196	65,8	27,30	1,52	0,1107
		$d^1\Pi_u$	112702	2372	66,3	30,36	1,54	0,1050
HBr	0,9956	$X^1\Sigma^+$	0	2650	45,2	8,473	0,226	0,1414
HCl	0,9799	$X^1\Sigma^+$	0	2990	52,05	10,59	0,302	0,1275
HF	0,9574	$X^1\Sigma^+$	0	4138	90,1	20,94	0,770	0,09171
HI	1,0002	$X^1\Sigma^+$	0	2310	39,7	6,551	0,183	0,1604
I_2	63,466	$X^1\Sigma_g^+$	0	214,6	0,613	0,03736	$1,17 \cdot 10^{-4}$	0,2667
		$B^3\Pi_{0u}^+$	15642	128,0	0,834	0,0292	$1,7 \cdot 10^{-4}$	0,3016
K_2	19,488	$X^1\Sigma_g^+$	0	92,64	0,354	0,0562	$2,19 \cdot 10^{-4}$	0,3923
Li_2	3,5091	$X^1\Sigma_g^+$	0	351,4	2,59	0,6727	$7,04 \cdot 10^{-3}$	0,2672
N_2	7,0038	$X^1\Sigma_g^+$	0	2360	14,46	2,010	0,0187	0,1094
		$A^3\Sigma_u^+$	50206	1460	13,9	1,440	0,013	0,1293
		$B^3\Pi_g$	59626	1734	14,5	1,638	0,0184	0,1212
		$a^1\Pi_g$	69290	1692	12,8	1,637	0,022	0,1213

Молекула	M	Электронное состояние	$E_{эл}, \text{ см}^{-1}$	$\hbar\omega_e, \text{ см}^{-1}$	$\hbar\omega_e x_e, \text{ см}^{-1}$	$B_e, \text{ см}^{-1}$	$\alpha_e, \text{ см}^{-1}$	$r_e, \text{ нм}$
N_2^+	7,0036	$\text{C}^3\Pi_u$	89147	2035	17,1	1,826	0,0197	0,1148
		$\text{X}^2\Sigma_g^+$	0	2207	16,1	1,932	0,020	0,1116
		$\text{B}^2\Sigma_g^+$	25461	2420	23,2	2,083	0,0195	0,1075
Na_2	11,498	$\text{X}^1\Sigma_g^+$	0	1592	0,726	0,1547	$7,9 \cdot 10^{-4}$	0,3078
NO	7,4688	$\text{X}^2\Pi_{1/2}$	0	1904	13,97	1,705	0,0178	0,1151
		$\text{X}^2\Pi_{3/2}$	121,1					
O_2^+	8,000	$\text{A}^2\Sigma^+$	43 966	2371	14,5	1,995	0,0164	0,1064
		$\text{B}^2\Pi_{1/2}$	45 918	1037	7,6	1,076	0,0116	0,1448
		$\text{B}^2\Pi_{3/2}$	45 947	1038	7,6	1,177	0,0189	0,1385
		$\text{X}^3\Sigma_g^-$	0	1580	12,1	1,446	0,0158	0,1207
		$a^1\Delta_g$	7 918	1509	12,9	1,426	0,0171	0,1215
O_2	8,000	$b^1\Sigma_g^+$	13 195	1432	14,0	1,400	0,0182	0,1227
		$\text{B}^3\Sigma_g^-$	49 802	700,4	8,0	0,819	0,11	0,1604
		$\text{X}^2\Pi_g$	0	1876	16,5	1,672	0,0198	0,1123
		$a^4\Pi_u$	—	1036	10,4	1,105	0,0157	0,1381
		$\text{A}^2\Pi_u$	38 795	900	13,4	1,062	0,0191	0,1409
OH	0,94838	$\text{X}^2\Pi$	0	3735	82,8	18,87	0,714	0,19706
SO	10,664	$\text{A}^2\Sigma^+$	32 682	3180	94,9	17,36	0,807	0,1012
		$\text{X}^3\Sigma$	0	1124	6,12	0,7089	$5,62 \cdot 10^{-3}$	0,1439

32.6. ПАРАМЕТРЫ МОЛЕКУЛ

Таблица 32.11

Дипольные моменты молекул [13]

Для учета колебательно-вращательного взаимодействия B_v (см. разд. 32.1) представлено в виде

$$B_v = B_e - \alpha_e(v + 1/2),$$

где $B_e = \hbar^2/(2I) = \hbar^2/(2Mr_e^2)$ — чисто вращательная константа; α_e — константа колебательно-вращательного взаимодействия; $M = M_1M_2/(M_1 + M_2)$ — приведенная масса двухатомной молекулы; M_1 и M_2 — массы атомов, составляющих молекулу; r_e — равновесное расстояние между ядрами атомов; при котором потенциальная энергия молекулы минимальна; $E_{эл}$ — энергия электронного состояния; ω_e и x_e — колебательные константы молекулы.

Дипольным моментом μ нейтральной молекулы называют произведение числа отрицательных (или положительных) зарядов N_Z , разделенных пространственно на среднее расстояние между их центрами масс $\bar{r}_N$: $\mu = N_Z \times \bar{r}_N$. Величина μ измеряется в дебаях. 1 дебай == 10^{-18} ед. СГСЭ.

Молекула	Формула	μ , дебай
Азот	N_2	0
Азота		
» двуокись	NO_2	0,3
» закись	N_2O	0,2
» окись	NO	0,16
Альдегид уксусный	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	2,7
Аммиак	NH_3	1,4
Ангидрид сернистый	SO_2	1,6
Анизол	$\text{C}_7\text{H}_8\text{N}$	1,2
Ацетил хлористый	$\text{C}_2\text{H}_3\text{OCl}$	2,5
Ацетон	$(\text{CH}_3)_2\text{CO}$	3,0
Ацетонитрил	$\text{C}_2\text{H}_3\text{N}$	3,4
Бензонитрил	$\text{C}_7\text{H}_5\text{N}$	3,9
Бромбензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Br}$	1,5
Бромформ	CHBr_3	1,0

**Электронные термы
двухатомных молекул**

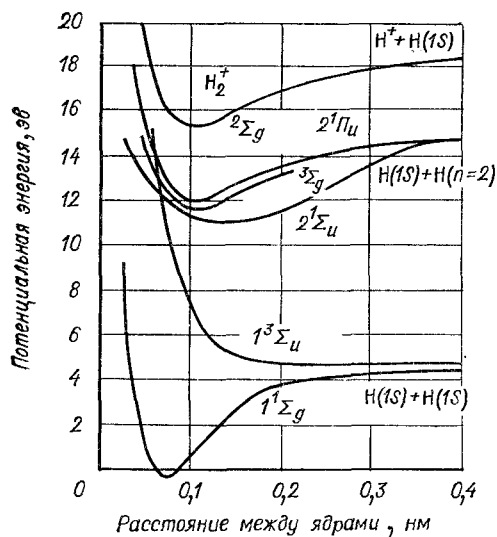


Рис. 32.8 Электронные термы молекулы H_2 [14].

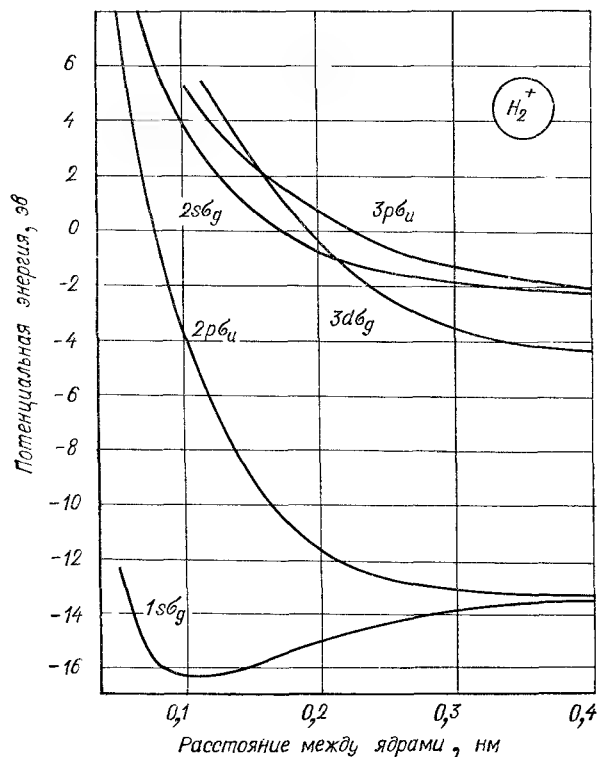


Рис. 32.9. Электронные термы молекулы H_2^+ [15].

Молекула	Формула	μ , дебай
Винил	C_2H_3Br	1,41
» бромистый	C_2H_3I	1,26
» иодистый	C_2H_3Cl	1,44
» хлористый	H_2O	1,84
Вода	H_2	0
Водород	HBr	0,8
» бромистый	CHN	2,9
» цианистый	HF	1,9
» фтористый	HCl	1,1
Водород хлористый	C_2H_4N	1,6
Диметиламин	CH_2F_2	1,96
Дифторметан	CH_2Cl_2	1,6
Дихлорметан	CHI_3	1,0
Иодоформ		
Калий	KBr	9,0
» бромистый	KCl	9,0
» хлористый	O_2	0
Кислород	$C_2H_4O_2$	1,7
Кислота уксусная	$LiBr$	6,2
Литий бромистый	LiI	6,6
» иодистый	LiF	6,2
» фтористый	LiH	6,0
Лития гидрид		
Метил	CH_3Br	1,8
» бромистый	CH_3I	1,6
» иодистый	CH_3Cl	1,86
» хлористый	$C_6H_5NO_2$	3,8
Нитробензол	CH_3NO_2	3,1
Нитрометан	$C_2H_3NO_2$	3,4
Нитроэтилен	C_5H_5N	2,2
Пиридин	H_2S	1,1
Сероводород	CH_4O	1,65
Спирт метиловый	CHF_3	1,6
Трифторметан	CO	0,1
Угарный газ	CO_2	0
Углекислый газ	CH_2O	2,2
Формальдегид	C_6H_5Cl	1,6
Хлорбензол	$CHCl_3$	1,2
Хлороформ		
Цезий		
» иодистый	CsI	11,0
» фтористый	CsF	7,6
» хлористый	$CsCl$	10,4
Циан		
» бромистый	$CNBr$	2,9
» иодистый	CNI	3,7
» хлористый	$CNCl$	2,8
Эфир		
» метиловый	C_2H_6O	1,3
» этиловый	$(C_2H_5)_2O$	1,1

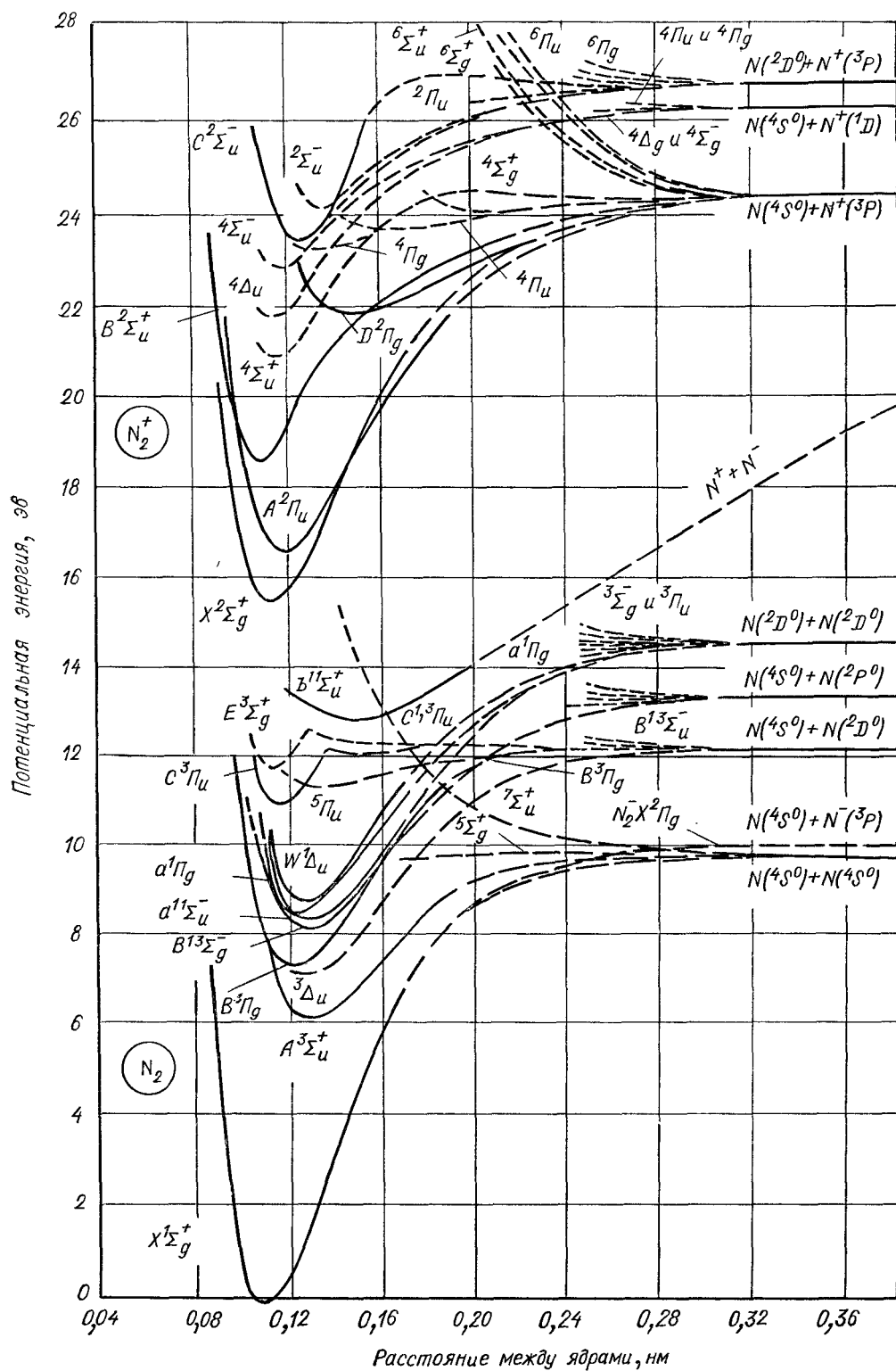


Рис. 32.10. Электронные термы молекул N_2 и N_2^+ [16].

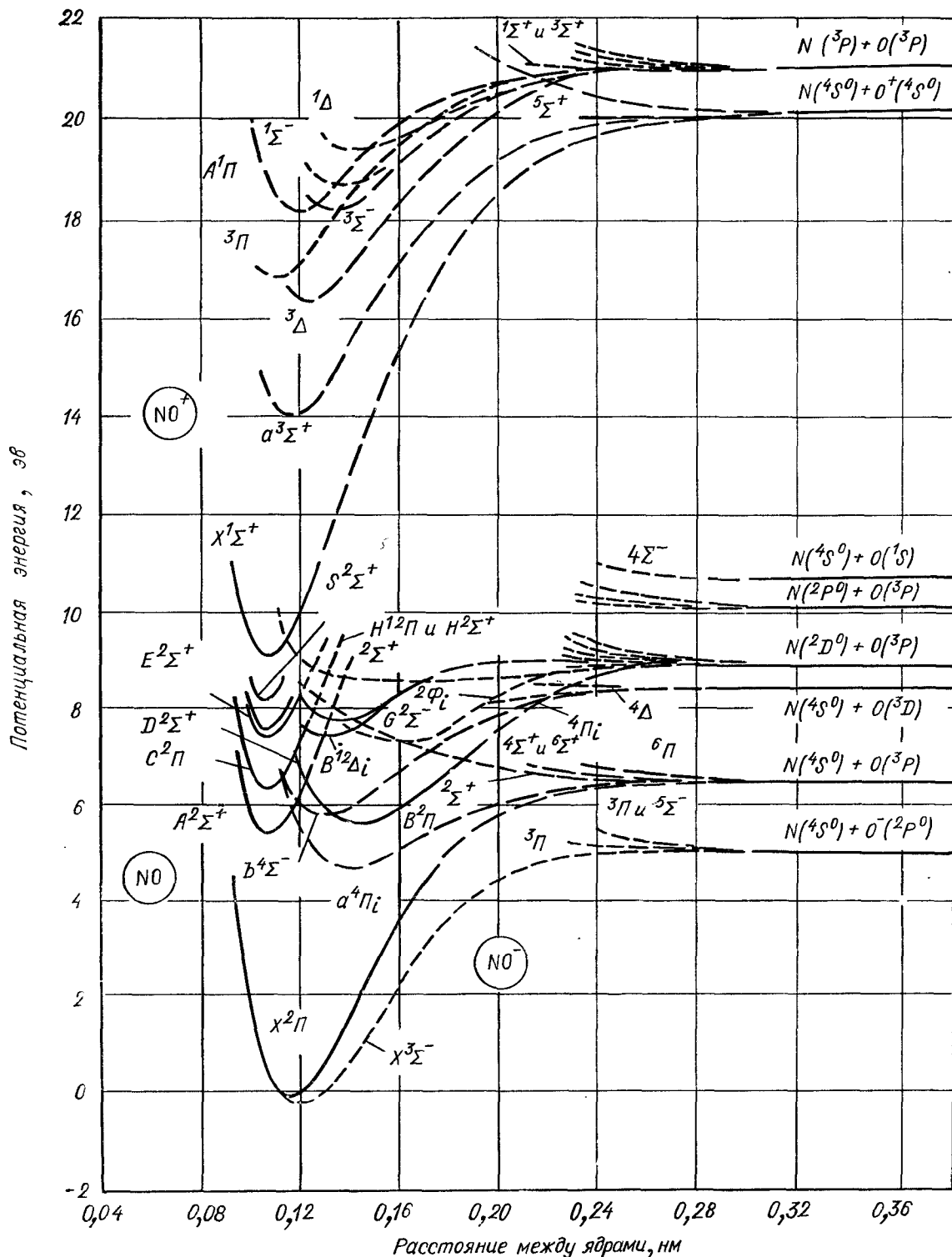


Рис. 32.11. Электронные термы молекул NO , NO^+ и NO^- [16].

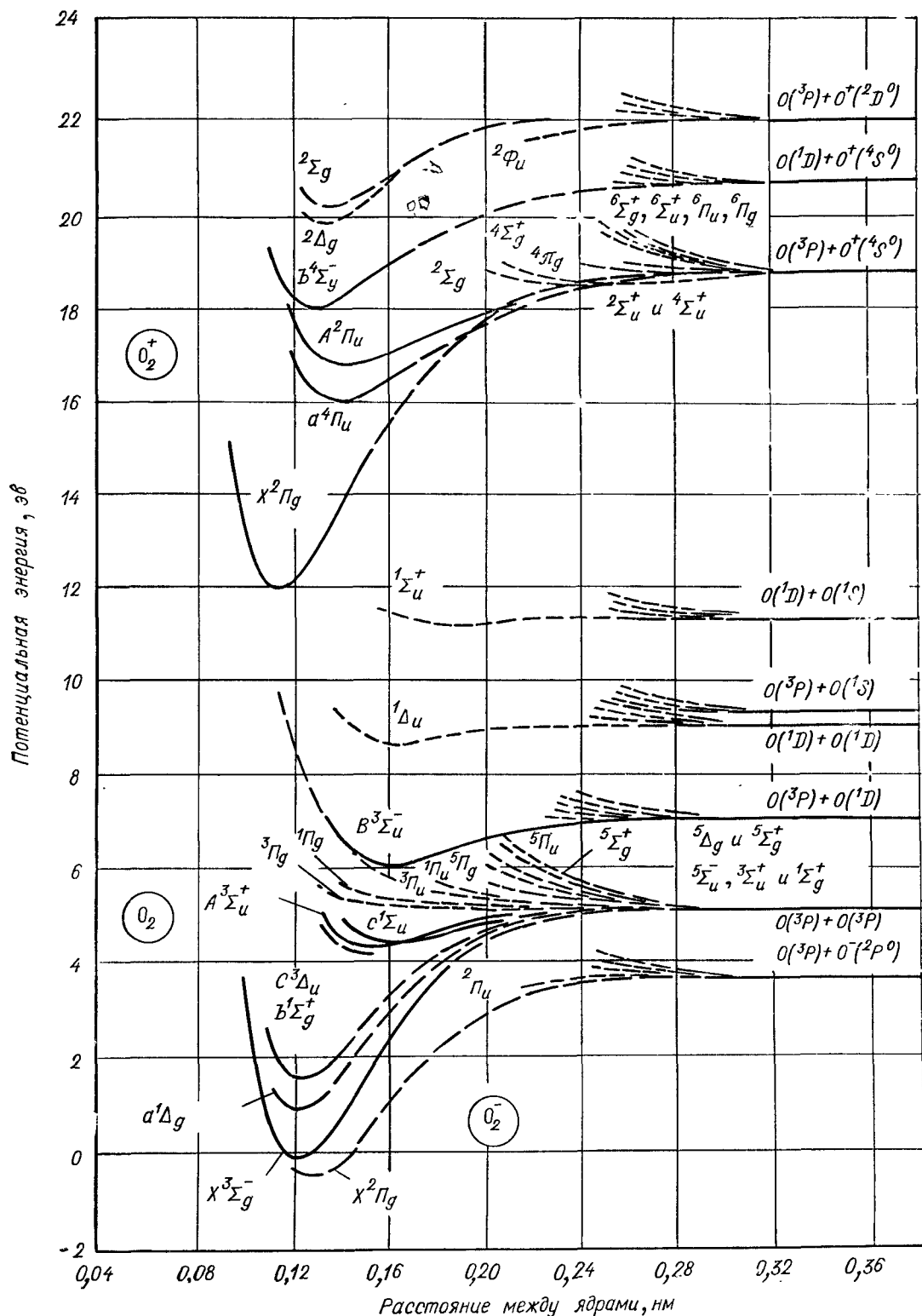


Рис. 32.12. Электронные термы молекул O_2 , O_2^+ и O_2^- [16].

1. Соболев И. И. Введение в теорию атомных спектров. М., Физматгиз, 1963.
2. Ельяшевич М. А. Атомная и молекулярная спектроскопия. М., Физматгиз, 1962.
3. Аллен К. У. Астрофизические величины. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
4. Wiese W. L. e. a. Atomic Transition Probabilities, NSRDS-NBS4, Washington, 1966.
5. Стриганов А. Р., Свентцкий Н. С. Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных атомов. М., Атомиздат, 1966.
6. Taschenbuch für Chemiker und Physiker. Berlin, Springer Verlag, 1943.
7. Зайдель А. Н. и др. Таблицы спектральных линий. М.—Л., Гостехиздат, 1962.
8. Flemberg H. «Ark. Mat. Astr. Fys.», 1942, Bd 28A, N 18, S. 1.
9. Kelly R. L. Naval Research Laboratory. Report 6648, Washington, 1968.
10. Вайнштейн Л. А., Сафронова У. И. «Краткие сообщения по физике», 1972, т. 3, с. 40.
11. «Trans. IAU», 1961, v. XI B, p. 215.
12. Герцберг Г. Электронные спектры и строение многоатомных молекул. Пер. с англ. М., «Мир», 1969.
13. Осипов О. А., Минкин В. И. Справочник по дипольным моментам. М., «Высшая школа», 1965.
14. Габович М. Д. Физика и техника плазменных источников ионов. М., Атомиздат, 1972.
15. Madsen M. M., Peak I. M. Eigenparameters for the Lowest Twenty Electronics States of the Hydrogen Molecule Ion.—«Atomic Data», 1971, v. 2 (3), p. 171.
16. Смирнов Б. М. Физика слабоионизованного газа. М., «Наука», 1972.

ГЛАВА 33

ЛАЗЕРЫ

Название «лазер» (по другой терминологии — оптический квантовый генератор — ОКГ) образовано по первым буквам сочетания английских слов: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation — усиление света с помощью вынужденного излучения, что отражает основной физический принцип устройств, генерирующих монохроматическое излучение в оптическом диапазоне частот от вакуумного ультрафиолета до дальней инфракрасной области.

Основными элементами лазера являются: активная среда, источник накачки, возбуждающий вещество активной среды, и резонатор. В обычных условиях отдельные возбужденные атомы вещества переходят на более низкие энергетические уровни спонтанно, т. е. независимо друг от друга. Целью возбуждения активной среды в лазере является такое распределение атомов по возбужденным уровням, при котором между двумя выбранными уровнями достигается инверсия. Состояние с инверсной населенностью отличается от равновесного тем, что на верхнем уровне скапливается существенно больше частиц, чем это диктуется условием равновесия. В результате число переходов с излучением фотонов между данными уровнями оказывается больше числа переходов с поглощением. Такое селективное возбуждение верхних уровней и обеспечивается источником накачки.

Резонатор лазера (система зеркал, между которыми располагается активная среда) обеспечивает обратную связь между световой волной, испущенной какой-либо частью атомов вещества, и атомами, еще находящимися в возбужденном состоянии. В результате этого происходит упорядочение испускания фотонов атомами активного вещества независимо от момента самого акта испускания, т. е. переходы между верхним и нижним лазерными уровнями осуществляются когерентно. Одновременно лазерное излучение оказывается также монохроматическим. Благодаря применению резонатора лазерное излучение обладает и еще одним отличительным свойством: высокой направленностью. Все вместе это приводит к тому, что с помощью лазерных источников света можно создать напряженности электромагнитного поля, близкие к внутриатомным.

С точки зрения единообразия механизмов инверсии и методов накачки лазеры классифицируют по типу фазового состояния активного вещества. Газовые лазеры — на нейтральных и ионизованных атомах, молекулярные газовые лазеры; твердотельные — на ос-

нове примесных кристаллов, стекол и полупроводников; жидкостные — на растворах редкоземельных элементов и на основе красителей. Многообразие длин волн, генерируемых лазерами, может быть расширено методами нелинейной оптики.

33.1. ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ НА НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМАХ

Классификация газовых лазеров

В настоящее время инверсная населенность и генерация на нейтральных атомах в газовом разряде получена более чем на 450 переходах, принадлежащих 29 элементам (рис. 33.1 и табл. 33.1). По типу возбуждения газовые лазеры можно разделить на три большие группы:

- 1) лазеры с возбуждением в слабоионизованном постоянном или высокочастотном разряде;
- 2) лазеры с возбуждением импульсным разрядом с послесвечением;
- 3) лазеры с возбуждением импульсным разрядом с малым фронтом нарастания.

Слабоионизованный постоянный высокочастотный разряд. В качестве среды для непрерывно действующих газовых лазеров на нейтральных атомах чаще всего используется положительный столб тлеющего разряда. Плотность тока в таком разряде обычно порядка $100\text{--}200\text{ мА/см}^2$. Свойства плазмы положительного столба определяются напряженностью электрического поля вдоль разряда. В установившемся, несложном, однородном положительном столбе продольное электрическое поле таково, что число возникающих электронов и ионов равно диффузионным потерям заряженных частиц на стенках разрядной трубки. Электронная температура в плазме разряда автоматически устанавливается такой, которая необходима для поддержания потока положительных ионов и потерь электронов на стенках. В большинстве случаев, когда можно пренебречь объемной ионизацией и соударениями между электронами и атомами в метастабильном состоянии, средняя электронная температура определяется главным образом произведением давления газа в трубке P и диаметром трубки D . Чтобы воспроизвести заданные условия разряда в каком-либо чистом газе, необходимо только обеспечить постоянство про-

IA																		VIIA O					
H	IIA																	H	He				
Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII				IB	IIB	Al	Si	P	S	Cl	Ar					
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
Fr	Ra	Ac																					
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu							
			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr							

Рис. 33.1. Схематическая периодическая таблица. Заштрихованы элементы, для которых получена генерация в газовом разряде на нейтральных атомах [1].

изведения PD при постоянной электронной концентрации. В слабоионизованной плазме положительного столба электронная концентрация прямо пропорциональна плотности тока через разряд.

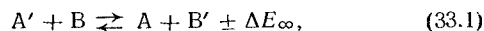
Импульсный разряд с послесвечением. Плотность тока в импульсных разрядах, в отличие от случая постоянного разряда, достигает значительно большего значения — до 300 а. см^2 , в результате чего имеет место сильная ионизация. В послесвечении импульсного разряда преобладают процессы с большими временами диссоциации и рекомбинации. Как в чистых газах, так и смесях, эти процессы приводят к импульсной генерации с большим усилением и большой выходной мощностью, но оптимальные условия в импульсном разряде или в послесвечении не устанавливаются простым произведением PD , а определяются напряжением пробоя газа, видом газа, потерями энергии в разряде, сопротивлением внешней цепи, формой переднего и заднего фронта импульса тока.

Импульсное возбуждение с малым фронтом нарастания. Импульсные разряды короткой длительности используются в основном для возбуждения газовых лазеров на самоограниченных переходах. В таких разрядах время нарастания импульса тока должно быть сравнимо с радиационным временем жизни верхнего лазерного уровня. Только в этом случае возможно достижение инверсной населенности в разряде. Плотность тока в максимуме импульса, необходимая для создания инверсии, оказывается порядка сотен и тысяч ампер на квадратный сантиметр. Условия возбуждения в разряде зависят от потерь энергии в единицу времени, давления газа, напряженности пробоя в газе, геометрии электродов и их расположения.

Механизмы селективного возбуждения

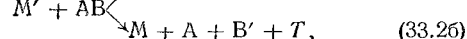
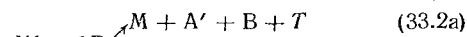
Во всех лазерных системах инверсная населенность достигается в результате действия одного или сразу нескольких перечисленных ниже механизмов возбуждения.

Передача возбуждения (атом—атом). В случае столкновений второго рода происходит передача потенциальной энергии от возбужденного атома другому атому в результате неупругого столкновения. Этот процесс можно записать следующим образом:



где ΔE_{∞} —разность потенциальных энергий возбужденных состояний A' и B' при бесконечном разделении атомов; A и B — чаще всего основные состояния атомов. Если A' — метастабильное состояние, а B' может обедняться за счет излучательных переходов, то реакция (33.1) идет в прямом направлении. Сечение такого процесса передачи возбуждения велико, если энергии возбуждения рассматриваемых уровней A' и B' достаточно хорошо совпадают, т. е. $\Delta E_{\infty} \rightarrow 0$ (резонансное столкновение). При $\Delta E_{\infty} \sim 0,1 \text{ эв}$ сечение передачи возбуждения мало. Передача возбуждения при столкновениях более вероятна в случае сохранения полного спина ($\Delta S=0$). Примером системы, в которой используется селективное возбуждение путем передачи возбуждения, является лазер на смеси гелий—неон (рис. 33.2).

Передача возбуждения при диссоциации (атом—молекула). Такой процесс можно записать в форме



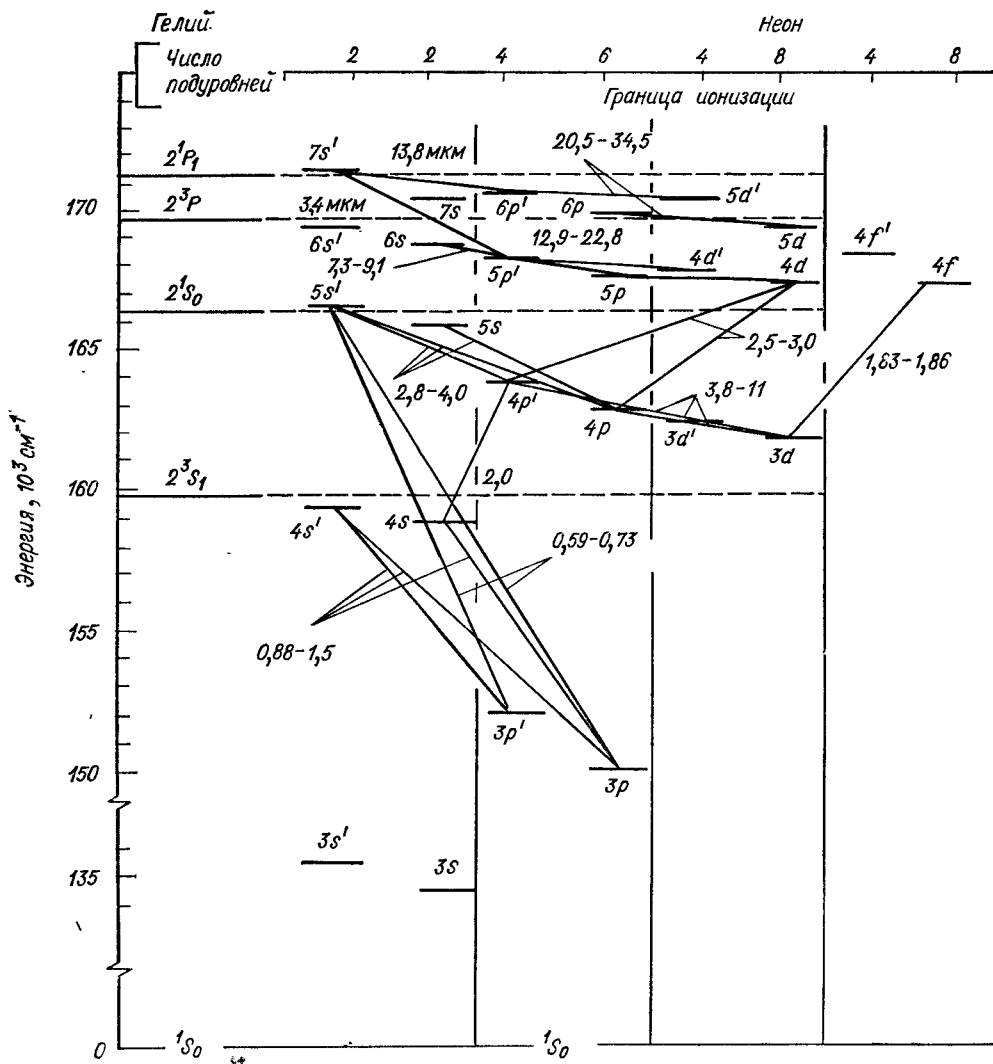


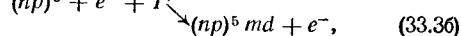
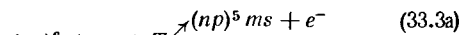
Рис. 33.2. Энергетическая схема уровней неона, показывающая совпадение уровней неона с уровнями гелия $2^3P_{2,1,0}$, 2^3S_1 , 2^1S_0 и 2^1P_1 и лазерные переходы, наблюдаемые в смеси He—Ne [1].

где M' — атом в возбужденном (обычно метастабильном) состоянии; T — кинетическая энергия. В таких реакциях атом M' взаимодействует с молекулой АВ и вызывает переход молекулы из основного состояния в состояние с силами отталкивания $(AB)^+$ или $(AB)'$ (рис. 33.3). В состоянии с силами отталкивания или преддиссоциативном состоянии у молекулы нет равновесия, и она диссоциирует на $A'+B$ или $A+B'$. Так как несколько преддиссоциативных состояний имеют энергию, приблизительно равную потенциальной энергии M' , а в реакции участвуют более двух атомов, то строгое требование на точность совпадения энергий, как это имеет место в передаче возбуждения между двумя атомами, нет. Избыток потенциальной энергии переходит в кинетическую энергию атомов A' и B' . Такой тип селективного возбуждения осуществляется, например, в лазерах на смеси аргона с кислородом и неона с кислородом.

Оптическая накачка. Если длина волны интенсивной линии совпадает с длиной волны резонансного пе-

рехода какого-либо атома (в пределах доплеровской ширины), то возможно селективное возбуждение этого резонансного состояния (рис. 33.4). Получение инверсной населенности возможно также и с возбужденного уровня, если он достаточно хорошо заселен. Следует отметить, что для нейтральных атомов случаи совпадения длин волн оптических переходов крайне редки.

Возбуждение электронным ударом. Если возбужденное состояние связано радиационным переходом с основным состоянием, то из приближения Борна без учета электронного обмена следует, что это возбужденное состояние селективно возбуждается в результате неупругих столкновений электронов с атомами. Так, для благородных газов селективное возбуждение из основного состояния осуществляется следующим образом:



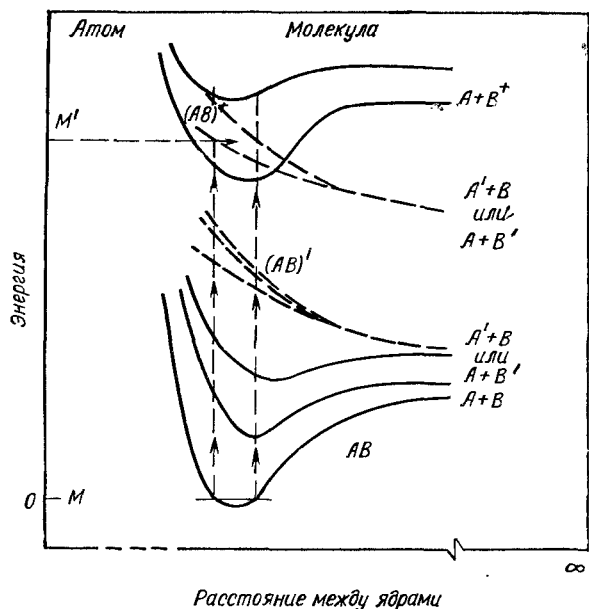


Рис. 33.3. Кривые потенциальной энергии двухатомной молекулы. Передача возбуждения при диссоциации молекулы через состояния с силами отталкивания $(AB)^+$ или $(AB)'$ показана стрелками; пунктирными кривыми показано несколько состояний с силами отталкивания, которые оканчиваются уровнями с одинаковым возбуждением. M' — метастабильное состояние [1].

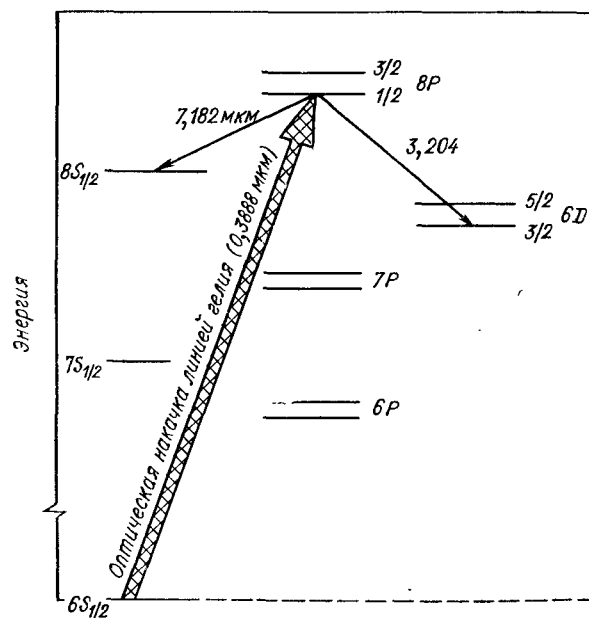


Рис. 33.4. Лазерные переходы в парах цезия (3,204 и 7,182 мкм) при оптической накачке [1].

где $(np)^6$, $(np)^5 ms$ и $(np)^5 md$ — электронные оболочки; $m = n + 1$, $n + 2$ и т. д., а $n = 2$ для Ne, 3 для Ar, 4 для Kr и 5 для Xe. Если произведение PD достаточно

велико для радиационного захвата резонансной линии, то при столкновениях возбуждение еще не передается другим электронным конфигурациям, то радиационный распад может происходить только через переходы, обозначенные на рис. 33.5 словом лазер. Этот тип селективного возбуждения в системе, где радиационный распад нижнего лазерного уровня происходит с достаточной скоростью, может привести к реализации непрерывной генерации. Возбуждение газовых лазеров на самоограниченных переходах осуществля-

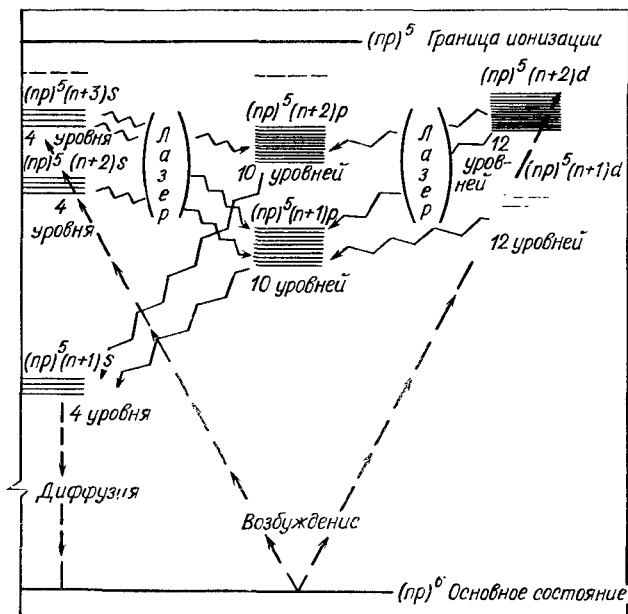


Рис. 33.5. Схематическая диаграмма электронных конфигураций, ответственных за лазерные переходы в чистом неоне, аргоне, криптоне и ксеноне [1]. (Стрелками указаны основные пути возбуждения и генерации.)

ется также селективным возбуждением электронным ударом. Такие лазерные системы, обладающие большим усилением и малой длительностью импульса генерации, уже осуществлены на парах Pb, Cu, Au, Ca, Sr и Mn, а также на благородных газах He, Ne, Ar, Kr и Xe. Расположение энергетических уровней лазера на самоограниченном переходе показано на рис. 33.6. Верхний лазерный уровень 1 возбуждается электронным ударом с основного состояния, а нижний лазерный уровень 2 — метастабилен (или квазистабилен). В такой трехуровневой системе при быстром возбуждении уровня 1 инверсная населенность между уровнями 1 и 2 из-за быстрого нарастания населенности нижнего лазерного уровня возможна только на время, меньшее, чем радиационное время жизни верхнего лазерного уровня.

Накачка излучательными каскадными переходами. Интенсивные лазерные переходы могут быть использованы для получения селективного возбуждения верхних уровней других лазерных переходов, которые, вследствие того что их четность совпадает с четностью основного состояния, не могут эффективно возбуждаться прямым электронным ударом. Эта ситуация осуществляется на ряде лазерных переходов в гелий-неоновом лазере.

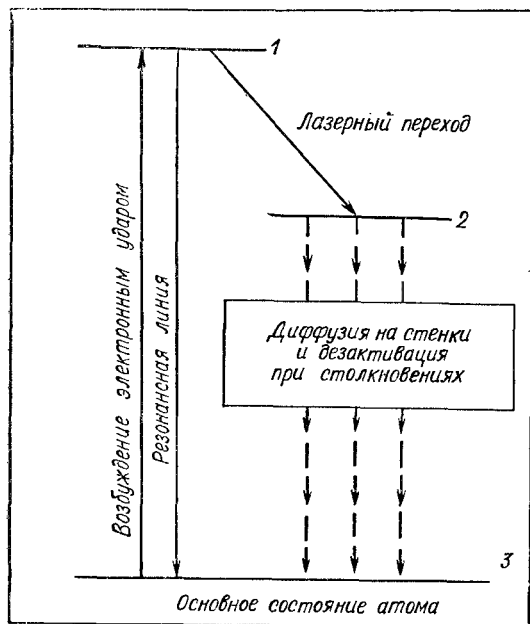
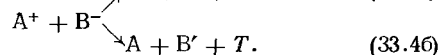
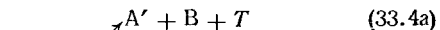


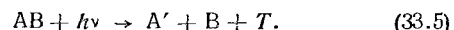
Рис. 33.6. Обобщенная схема процессов возбуждения и генерации в лазерах на самоограниченных переходах [1].

Нейтрализация заряда (ион-ионная рекомбинация). Нейтрализацию заряда можно записать в общем виде таким образом:



Избыток энергии, уносимой в виде кинетической энергии T одной из частиц A' или B' , порядка электрон-вольта. Частицы A^+ и B^- имеют сильную тенденцию образовывать определенные A' и B или A и B' , осуществляя тем самым селективное возбуждение одного из состояний A' или B' . Такой тип получения инверсии имеет место в лазере на смеси натрия и водорода, а также в послесвечении разряда в чистом кислороде и смесях благородных газов при больших давлениях.

Фотодиссоциация молекул. Широкие полосы поглощения молекул позволяют использовать большое количество энергии световой накачки. Излучение атомов, полученных в результате диссоциации, происходит в узких характеристических линиях спонтанного излучения атомов. При фотодиссоциации двухатомных молекул обычно один атом оказывается в возбужденном состоянии, а другой — в основном:



Энергия кванта должна быть больше 3 эв для диссоциации молекулы AB , возбуждения атома и передачи кинетической энергии образовавшимся атомам. Примером возбуждения атома при фотодиссоциации молекулы является фотолиз газообразных CF_3I и CH_3I .

Таблица 33 I

Лазерные переходы в нейтральных газах [1]

Лазерные переходы объединены по атомным группам, показанным на рис. 33.1, в порядке возрастания атомных номеров. Для большинства идентифицированных лазерных переходов значения длин волн линий указаны для измерений в воздухе. Для значений длин волн в вакууме применяется курсив. В соответствии с установившимися традициями сначала пишется верхний уровень, а затем нижний. Возбуждение газа указано сокра-

щенно: непр. — непрерывный слабоионизованный постоянный или высокочастотный разряд; имп. — импульсный разряд; кор. имп. — короткий импульсный разряд с малым фронтом нарастания тока. Иногда при идентификации переходов указаны все возможные уровни. Сомнительные идентификации помечены знаком «?». В ряде случаев указано значение PD или отдельно давление компонент смеси P и диаметр разрядной трубки D .

Группа, элемент	Длина волны, <i>мкм</i>	Идентификация	Возбуждение	Примечания
IA	Водород (рис. 33.7)	1,8751 Первый член серии Пашена $4f^2F_{7/2}^0-3d^2D_{5/2}$	имп.	Малая добавка водорода (0,01 <i>мм рт. ст.</i>) к гелию (3,5 <i>мм рт. ст.</i>), <i>D</i> = 7 <i>мм</i>
	Натрий (рис. 33.8)	1,1382 $4s^2S_{1/2}-3p^2P_{1/2}$	»	0,001—0,003 <i>мм рт. ст.</i> паров натрия в смеси с водородом, гелием или неоном (1—10 <i>мм рт. ст.</i>), <i>D</i> —12 <i>мм</i>
		1,1404 $4s^2S_{1/2}-3p^2P_{3/2}$	»	Условия те же

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация	Возбуждение	Примечания
Калий (рис. 33.9)	1,2434	$5s\ ^2S_{1/2} - 4p\ ^2P_{1/2}$	имп.	0,1 мм рт. ст. паров калия в смеси с водородом 3—5 мм рт. ст., $D=12$ мм Условия те же
	1,2523	$5s\ ^2S_{1/2} - 4p\ ^2P_{3/2}$	»	
Цезий	3,2040	$8p\ ^2P_{1/2}^0 - 6d\ ^2D_{3/2}$	непр	Пары цезия при 175°C, $D = 10$ мм Условия те же
	7,1821	$8p\ ^2P_{1/2}^0 - 8s\ ^2S_{1/2}$	»	
IB Медь (рис.33.10)	0,510554	$4p\ ^2P_{3/2}^0 - 4s\ ^2D_{5/2}$	кор. имп.	0,1 мм рт. ст. паров меди в смеси с гелием (1—3 мм рт. ст.), $D = 10$ мм Условия те же
	0,578213	$4p\ ^2P_{1/2}^0 - 4s\ ^2D_{3/2}$	»	
Золото	0,627818	$6p\ ^2P_{1/2}^0 - 6s\ ^2D_{3/2}$	»	Пары золота при 1500°C, $D = 10$ мм
IIA Кальций	5,5457	$4p\ ^1P_1^0 - 3d\ ^1D_2$	»	Пары кальция при 460°C в смеси с гелием или неоном (3 мм рт. ст.) Давление паров стронция при 46 °C, 3 мм рт. ст. гелия или неона
	6,4567	$5p\ ^1P_1^0 - 4d\ ^1D_2$	кор. имп.	
IIB Кадмий	0,8390*	—	имп.	0,03—0,05 мм рт. ст. паров кадмия, 2—20 мм рт. ст. гелия, $D=12$ мм 0,03—0,05 мм рт. ст. паров кадмия, 0,05—1 мм рт. ст. гелия или неона, $D = 12$ мм
	1,1869*	—	»	

* Возможно, что это линия Cd II.

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация	Возбуждение	Примечание
II В Кадмий Ртуть (рис. 33.11)	1,4330	$6p\ ^3P_1^0 - 6s\ ^3S_1$	имп.	0,03—0,05 мм рт. ст. паров кадмия, 2—20 мм рт. ст. гелия, $D = 12$ мм
	1,6485	$4f\ ^3F_{4,3,2} - 5d\ ^3D_3$	»	Условия те же
	0,3545 0,7065*	— —	имп. »	Смесь паров ртути и аргона ~10 ⁻³ мм рт. ст. ртути и аргона, $D = 5$ мм
	0,8677	—	»	0,001 мм рт. ст. паров ртути, 0,8—1,2 мм рт. ст. гелия, $D = 15$ мм
	1,11768	$7p\ ^1P_1^0 - 7s\ ^3S_1$	»	0,09—0,12 мм рт. ст. паров ртути, 0,005—0,05 мм рт. ст. гелия
	1,2222	—	»	0,001 мм рт. ст. паров ртути, 0,2 мм рт. ст. аргона, $D = 5$ мм
	1,2246	—	»	Смесь паров ртути и аргона, $D = 5$ мм
	1,2545	—	»	0,001 мм рт. ст. паров ртути, 0,8—1,2 мм рт. ст. гелия, $D = 15$ мм
	1,2760	—	»	0,001 мм рт. ст. паров ртути, 0,2 мм рт. ст. аргона, $D = 5$ мм
	1,2981	—	»	0,001 мм рт. ст. паров ртути, 0,8 мм рт. ст. аргона или 1,2 мм рт. ст. гелия, $D = 15$ мм
	1,3655	—	»	0,001 мм рт. ст. паров ртути, 0,8—1,2 мм рт. ст. гелия, $D = 15$ мм
	1,36755	$7p\ ^3P_1^0 - 7s\ ^3S_1$	»	0,09—0,12 мм рт. ст. паров ртути, 0,005—0,05 мм рт. ст. гелия, $D = 6$ мм
	1,5295	$6p'\ ^3F_2^0 - 7s\ ^3S_1$	бепр.	0,09—0,12 мм рт. ст. паров ртути, 0,1—1,0 мм рт. ст. гелия, неона, криптона или аргона, $D = 6$ мм

* Возможно, что это линия Ag I.

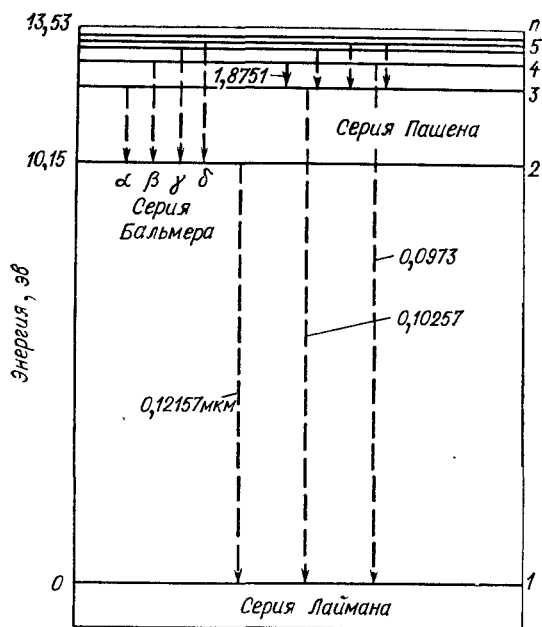


Рис. 33.7. Лазерный переход в водороде (1,875 мкм в серии Пашена) [1].

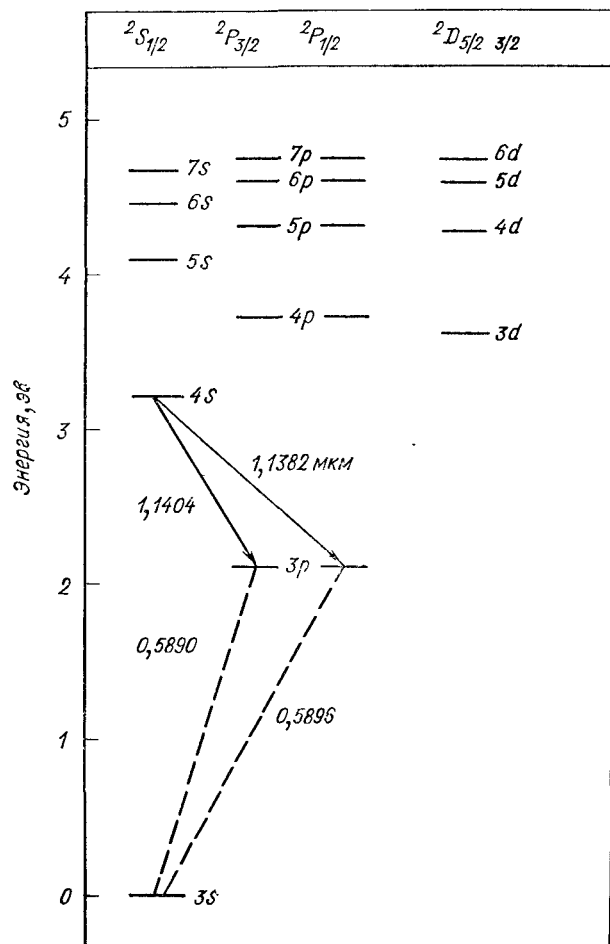


Рис. 33.8. Схема лазерных переходов в натрии [1].

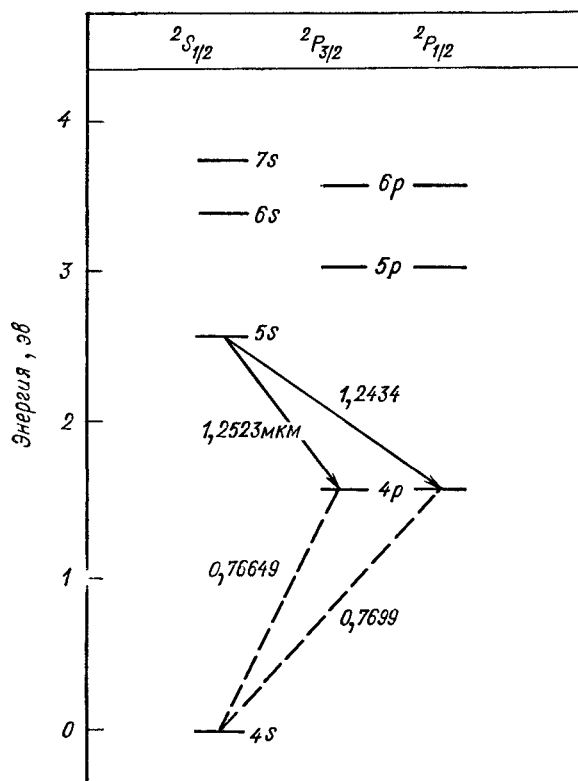


Рис. 33.9. Схема лазерных переходов в калии [1].

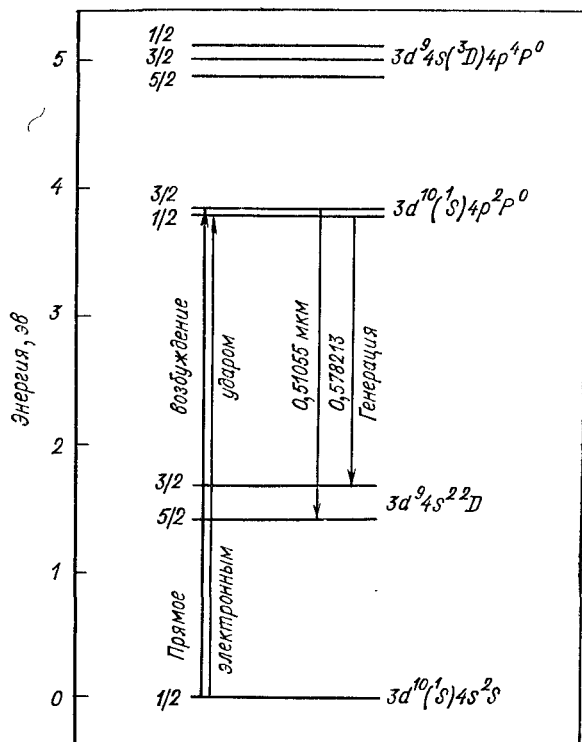


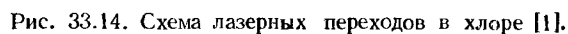
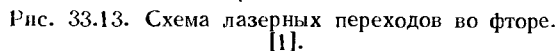
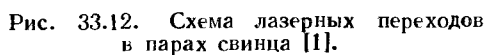
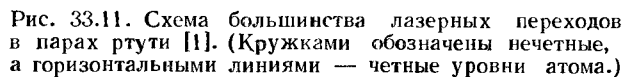
Рис. 33.10. Схема лазерных переходов в парах меди (0,5105 и 0,5782 мкм) [1].

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация	Возбуждение	Примечания
IIБ Ртуть	1,69202	$5f\ ^1F_3^0 - 6d\ ^1D_2$	имп.	0,09—0,12 мм рт. ст. паров ртути, 0,005—0,05 мм рт. ст. гелия, $D = 6$ мм
	1,69423	$5f\ ^3F_2^0 - 6d\ ^3D_1$	»	Условия те же
	1,70733	$5f\ ^3F_4^0 - 6d\ ^3D_3$	»	
	1,71098	$5f\ ^3F_3^0 - 6d\ ^3D_2$	»	
	1,73297	$7d\ ^1D_2 - 7p\ ^1P_1^0$	»	0,09—0,3 мм рт. ст. паров ртути, 0,005—0,1 мм рт. ст. гелия, неона, криптона или воздуха, $D = 6$ мм
	1,81296	$6p'\ ^3F_4^0 - 6d\ ^3D_3$	непр.	Условия те же
	3,34*	$6p'\ ^3F_4 - 8s\ ^4S_1$	имп.	0,3 мм рт. ст. паров ртути, 0,25 мм рт. ст. криптона, $D = 8$ мм
	3,930	$6d\ ^3D_3 - 6p'\ ^3P_2^0$ или $5gG - 5fF^0$	»	Условия те же
	5,880	$6p'\ ^1P_1^0 - 7d\ ^3D_2$	»	
	6,490	$9s\ ^1S_0 - 8p\ ^1P_1^0$ или $11p\ ^3P_1^0 - 10s\ ^3S_1$	»	
III Таллий	0,5350	$7s\ ^2S_{1/2} - 6p\ ^2P_{3/2}^0$	кор. имп.	Более 0,01 мм рт. ст. паров таллия, несколько мм рт. ст. неона или гелия, $D = 1,3 \div \div 3,0$ мм
IV Углерод	0,833515	$3p\ ^1S_0 - 3s\ ^1P_1^0$	имп.	4 мм рт. ст. смеси углекислого газа и неона, $D = 15$ мм
	0,94057	$3p\ ^1D_2 - 3s\ ^1P_1^0$	»	Условия те же или 2—16 мм рт. ст. смеси СО и гелия
	1,06831	$3p\ ^3D_2 - 3s\ ^3P_1^0$	»	Условия те же
	1,06853	$3p\ ^3D_1 - 3s\ ^3P_0$	»	0,05 мм рт. ст. окиси углерода и 2—16 мм рт. ст. гелия
	1,06912	$3p\ ^3D_3 - 3s\ ^3P_2^0$	непр.	0,01 мм рт. ст. углекислого газа или окиси углерода, 2 мм рт. ст. гелия, $D = 5$ мм
	1,45425	$3p\ ^1P_1 - 3s\ ^1P_1^0$	»	Условия те же
	2,0645	$5d\ ^1D_2^0 - 4p\ ^3P_2$	»	0,02 мм рт. ст. окиси углерода, 1 мм рт. ст. гелия, $D = 10$ мм

* Возможно, это линия не Hg I, а Kг I.

Группа, элемент	Длина волн, мкм	Идентификация	Возбуждение	Примечания
IV	Углерод	3,4046	$4d\ ^1D_2^0 - 4p\ ^1P_1$	непр. » » } 0,02 мм рт. ст. окиси углерода, 1 мм рт. ст. гелия, $D=10$ мм
		3,5155	$6d\ ^3P_2^0 - 5p\ ^3D_3$	
		5,5956	$4p\ ^3S_1 - 3d\ ^3P_1^0$	
	Кремний	1,198418	$4p\ ^3D_2 - 4s\ ^3P_1^0$	непр. » » } 0,03 мм рт. ст. SiCl_4 или 0,04 мм рт. ст. SiCl_4 и 0,5 мм рт. ст. неона, $D=6$ мм Условия те же
		1,203148	$4p\ ^3D_3 - 4s\ ^3P_2^0$	
		1,588402	$5s\ ^3P_1^0 - 4p\ ^3D_1$	
	Олово	0,657903	$10d\ ^3D_{0,2} - 6p\ ^3P_1$	имп. } Пары SnCl_4 при комнатной темпе- ратуре, $D=5,6$ мм
		0,363954	$6p\ 7s\ ^3P_1^0 - 6p\ ^3P_1$	
	Свинец (рис. 33.12)	0,405779	$6p\ 7s\ ^3P_1^0 - 6p\ ^3P_2$	кор имп » » » } Давление паров ^{208}Pb при 800 — 900°C с добавлением гелия, не- она или аргона, $D=2$ мм Условия те же
		0,406213	$6p\ 6d\ ^3D_1^0 - 6p\ ^2D_2$	
		0,72290	$7s\ ^3P_1^0 - 6p\ ^2D_2$	
V	Азот	0,4120*	—	имп. » » » » » » » » » » » » » » » } 0,001—0,02 мм рт. ст. смеси азота и ртути, $D=3$ мм Разряд (θ-пинч) в азоте (1 мм рт. ст.), $D=25$ мм Условия те же 0,001—0,02 мм рт. ст. смеси азо- та и ртути, $D=3$ мм Условия те же 4 мм рт. ст. смеси азота и гелия, $D=15$ мм 0,2—0,7 мм рт. ст. азота, 3 мм рт. ст. гелия, $D=15$ мм 4 мм рт. ст. смеси азота и ге- лия, $D=15$ мм непр. 0,02—0,2 мм рт. ст. азота, 0,01—0,1 мм рт. ст. кислоро- да, водорода, гелия и неона, $D=3$ мм; или 4 мм рт. ст. смеси азота и гелия, $D=15$ мм Условия те же » 0,2—0,7 мм рт. ст. азота; или 0,15 мм рт. ст. азота, 3 мм рт. ст. гелия, $D=15$ мм непр. 0,03 мм рт. ст. окиси или закиси азота, 2 мм рт. ст. гелия или 1 мм рт. ст. неона, $D=5$ мм
		0,4321	—	
		0,4329	—	
		0,4525*	—	
		0,4750*	—	
		0,5440*	—	
		0,5500*	—	
		0,5540*	—	
		0,85940	$3p\ ^2P_{1/2}^0 - 3s\ ^2P_{1/2}$	
		0,86284	$3p\ ^2P_{3/2}^0 - 3s\ ^2P_{3/2}$	
		0,91876	$3p'\ ^2D_{3/2}^0 - 3s'\ ^2D_{3/2}$	
		0,93868	$3p\ ^2D_{3/2}^0 - 3s\ ^2P_{1/2}$	
		0,93928	$3p\ ^2D_{3/2}^0 - 3s\ ^2P_{3/2}$	
		1,34295	$3p\ ^2S_{1/2}^0 - 3s\ ^2P_{1/2}$	
		1,3585	$3p\ ^2S_{1/2}^0 - 3s\ ^2P_{3/2}$	

* Есть некоторые сомнения относительно точности измерения длины волны этой линии, поэтому ее отождествление с линией азота может оказаться ошибочным.



Группа, элемент	Длина, вол-ны, мкм	Идентификация	Возбуждение	Примечания
V Азот	1,45423	—	имп.	0,2—0,7 мм рт. ст. азота; или 0,15 мм рт. ст. азота, 3 мм рт. ст. гелия, $D = 15$ мм
	1,4577	$4s\ 4P_{3/2} - 3p\ 2D_{5/2}^0$	непр.	0,03 мм рт. ст. окиси или закиси азота, 2 мм рт. ст. гелия или 1 мм рт. ст. неона, $D = 5$ мм
	3,7942	—	имп.	0,2—0,7 мм рт. ст. азота; или 0,15 мм рт. ст. азота, 3 мм рт. ст. гелия, $D = 15$ мм
	3,8154	—	»	Условия те же
VI Кислород	0,844628 0,844638 0,844672 0,844680	$3p\ 3P_{0,2,1} - 3s\ 3S_1^0$	непр.	0,01—0,04 мм рт. ст. кислорода, 0,35 мм рт. ст. неона, 1,4 мм рт. ст. аргона, окиси углерода, углекислого газа или гелия, $D = 7$ мм; или 0,1—2 мм рт. ст. кислорода, $D = 10$ мм
	0,882045	$3p'\ 1F_3 - 3s'\ 1D_2^0$	имп.	В смеси углекислого газа и неона (4 мм рт. ст.), $D = 15$ мм
	2,890	$4p\ 3P - 4s\ 3S^0$	непр.	0,08 мм рт. ст. кислорода, 0,5—1,0 мм рт. ст. гелия или неона, $D = 5 \div 7$ мм
	4,563	$4p\ 3P - 3d\ 3D^0$	»	Условия те же
	5,981	$7d\ 3D^0 - 6p\ 3P$	»	0,08 мм рт. ст. кислорода, 0,5—1,0 мм рт. ст. гелия или неона, $D = 5 \div 7$ мм
	6,8161	$3s'\ 3D_2^0 - 4p\ 3P_{2,1,0}$	имп.	В чистом кислороде, $D = 15$ мм
	6,858	$5p\ 3P - 5s\ 3S^0$	непр.	0,08 мм рт. ст. кислорода, 0,5—1,0 мм рт. ст. гелия или неона, $D = 5 \div 7$ мм
	6,8731	$3s'\ 3D_3^0 - 4p\ 3P_2$	имп.	В чистом кислороде, $D = 15$ мм
	10,400	$5p\ 3P - 4d\ 3D^0$	непр.	0,08 мм рт. ст. кислорода, 0,5—1,0 мм рт. ст. гелия или неона, $D = 5 \div 7$ мм
	Сера	0,516032 ^{2*}	имп.	0,015—0,06 мм рт. ст. двуокиси серы, $D = 1,5—6$ мм
		0,521962 ^{2*}	»	Условия те же
		1,0455	непр.	0,03 мм рт. ст. SF ₆ или 0,03 SF ₆ , 2 мм рт. ст. гелия. Так же в смеси H ₂ S с гелием, неонem или аргоном, $D = 5$ мм
	1,0636	$4p'\ 1F_3 - 4s'\ 1D_2^0$	»	Условия те же
	Теллур	0,5454 ^{2*}	имп.	Теллур при температуре 125—250°C, 0,1—0,25 мм рт. ст. неона, $D = 6$ мм
		0,5640 ^{2*}	»	0,001—0,002 мм рт. ст. теллура, 0,2 мм рт. ст. неона, $D = 3$ мм
		0,6350	»	Условия те же
VIIA Фтор (рис. 33.13)	0,7024	$3p\ 2P_{3/2}^0 - 3s^2\ P_{1/2}$	»	0,03—0,1 мм рт. ст. CF ₄ , CF ₆ или C ₂ F ₆ , 2—10 мм рт. ст. гелия, прокачка этой смеси, $D = 25$ мм Условия те же
	0,7009	$3p\ 2P_{3/2}^0 - 3s\ 2P_{3/2}$	»	
	0,7129	$3p\ 2P_{1/2}^0 - 3s\ 2P_{1/2}$	»	

* Это триплет О I. Четыре линии в генерации возникают из-за большой доплеровской ширины линии (вызвано это возбуждением и диссоциацией молекул кислорода) и радиационного захвата центра линии. Вследствие этого усиление на крыльях линии больше.

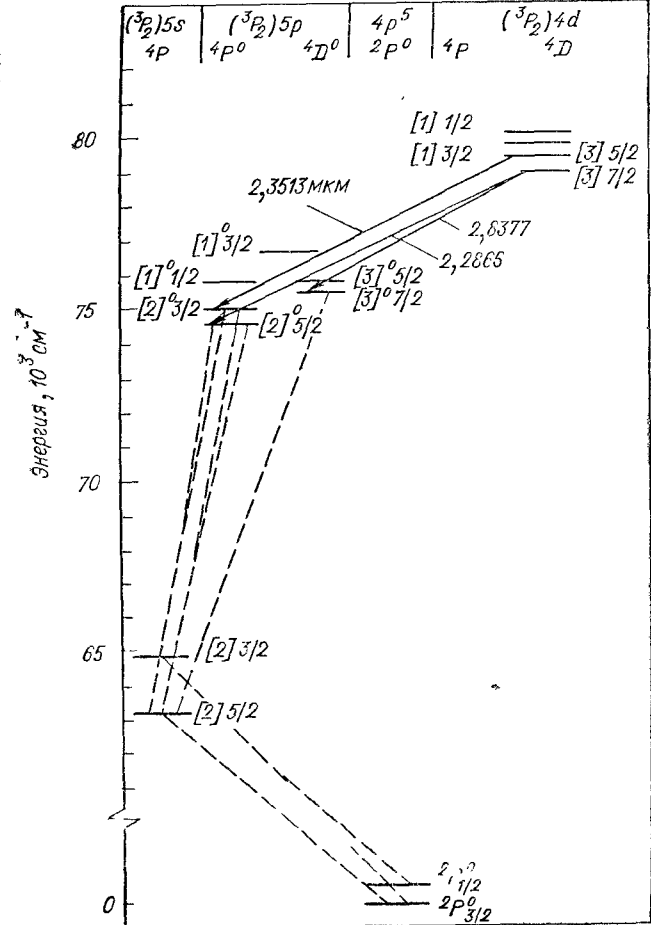
^{2*} Возможно, это линия иона.

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация	Возбуждение	Примечания	
VIIA Хлор (рис. 33.14)	0,945206	$4p^2P_{3/2}^0 - 4s^2P_{1/2}$	непр.	0,01—0,08 мм рт. ст. хлора, 0,3—3 мм рт. ст. гелия или неона, $D = 6$ мм	
	1,3863	$3d^2D_{3/2} - 4p^4D_{5/2}^0$	имп.	0,3 мм рт. ст. HCl, 0,1 мм рт. ст. гелия или неона, $D = 14$ мм	
	1,3893	$3d^4P_{3/2} - 4p^4D_{3/2}^0$	»	Условия те же	
	1,58697	$3d^4F_{9/2} - 4p^4D_{7/2}$	непр.	В смеси фреона и гелия (3,3 мм рт. ст.)	
	1,9755	$3d^4D_{7/2} - 4p^4P_{3/2}^0$	»	В HCl или 0,1 мм рт. ст. хлора, $D = 6$ мм	
	2,0199	$3d^4D_{5/2} - 4p^4P_{3/2}$	»	Условия те же	
	2,4470	$3d^4D_{7/2} - 4p^4D_{7/2}^0$	»	0,09 мм рт. ст. хлора, 1,5—7,2 мм рт. ст. гелия, $D = 25$ мм	
	3,0672	$5p^2D_{5/2}^0 - 5s^2P_{3/2}$	»	0,09 мм рт. ст. хлора, 2,1 мм рт. ст. аргона $D = 25$ мм	
	Бром (рис. 33.15)	2,2866	$4d[3]_{7/2} - 5p[2]_{5/2}^0$	непр	0,3 мм рт. ст. бромистого водорода, $D = 12$ мм
		2,3513	$4d[3]_{5/2} - 5p[2]_{3/2}^0$	»	} Условия те же
		2,8377	$4d[3]_{7/2} - 5p[3]_{7/2}^0$	»	
	Иод	0 980*	—	имп.	0,1 мм рт. ст. — давления паров иода, несколько мм рт. ст. гелия, $D = 5$ мм
		1,010*	—	»	} Условия те же
		1,030*	—	»	
		1,060*	—	»	
		1,3152	$5p^5 2P_{1/2}^0 - 5p^5 2P_{3/2}$	имп. (фотолиз)	30 мм рт. ст. CF ₃ I или CH ₃ I, $D = 7$ мм
		1,4542	$7p[1]_{3/2}^0 - 6d[2]_{3/2}$	»	0,3 мм рт. ст. HI, $D = 14$ мм
		2,5987	$5d[2]_{3/2} - 6p[1]_{3/2}^0$	непр.	0,3 мм рт. ст. HI, 0,3 мм рт. ст. неона, $D = 14$ мм
		2,7572	$(^1D_2)5d[2]_{3/2} - (^1D_2)6p[1]_{3/2}^0$	»	В HI, $D = 12$ мм
		3,036	$5d[2]_{3/2} - 6p[1]_{3/2}^0$	»	В смеси CH ₃ I и паров иода или CF ₃ I с гелием, аргоном или ксеноном, $D = 50$ мм
		3,236	$(^3P_2)5d[2]_{3/2} - (^3P_2)6p[1]_{3/2}^0$	»	В парах иода или HI, $D = 12$ мм
		3,429	$(^3P_2)5d[4]_{7/2} - (^3P_2)6p[3]_{5/2}^0$	»	В парах иода, $D = 12$ мм
		4,858	$5d[1]_{3/2} - 6p[2]_{3/2}$	»	В смеси CF ₃ I, CH ₃ I или паров иода с гелием, аргоном или ксеноном, $D = 50$ мм
		4,862	$5d[4]_{9/2} - 6p[3]_{7/2}$	»	} Условия те же
		5,497	$5d[2]_{5/2} - 6p[1]_{3/2}$	»	
		6,720	$6s[2]_{3/2} - 6p[1]_{3/2}$	»	
		6,902	$5d[3]_{7/2} - 6p[2]_{5/2}$	»	
		9,016	$5d[3]_{7/2} - 6p[2]_{5/2}$	»	
VIII Марганец (рис. 33.16)	0,53410652*	$y^6P_{7/2}^0 - a^6D_{7/2}$	кор. имп.	0,1—2,0 мм рт. ст. паров марганца (температура 1100—1300°C), 1,0—2,0 мм рт. ст. гелия, $D = 10$ мм	

* Возможно, это линия однократно ионизованного иода.

** Генерация наблюдалась на шести компонентах сверхтонкой структуры этой линии.

Рис. 33.15. Схема лазерных переходов в атомарном броме [1]. (Штрихами указаны сильные спонтанные переходы.)



Продолжение табл. 33.1

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация	Возбуждение	Примечания
VIII Марганец (рис. 33.16)	0,5420368	$6P_{5/2}^o - 6D_{7/2}$	к.ср. гмп.	0,1—2,0 мм рт. ст. паров марганца (температура 1100—1300°С), 1,0—2,0 мм. рт. ст. гелия, D = 10 мм
	0,5470640	$6P_{5/2}^o - 6D_{5/2}$	» »	
	0,5481345	$6P_{3/2}^o - 6D_{5/2}$	» »	
	0,5516777	$6P_{3/2}^o - 6D_{3/2}$	» »	
	0,5537149	$6P_{3/2}^o - 6D_{1/2}$	» »	
	1,28997	$6P_{7/2}^o - 6D_{9/2}$	» »	
	1,32938	$6P_{7/2}^o - 6D_{7/2}$	» »	
	1,33179	$6P_{5/2}^o - 6D_{7/2}$	» »	
	1,36257	$6P_{5/2}^o - 6D_{1/2}$	» »	
	1,38638	$6P_{3/2}^o - 6D_{3/2}$	» »	
0 Гелий (рис. 33.17)	1,8685	$4f^3F - 3d^3D$	непр.	0,4 мм рт. ст. гелия, D = 6 мм
	1,9543	$4p^3P - 3d^3D$	»	Условия те же
	2,05813	$2^1P_1 - 2^1S_0$	кор. имп.	2,7 мм рт. ст. гелия, D = 1,3 мм
	2,0603	$7d^3D - 4p^3P$	непр.	8,0 мм рт. ст. гелия, примесь аргона или азота*, D = 7 мм
	95,8	$3p^1P_1 - 3d^1D_1$	»	0,1 мм рт. ст. гелия, D = 60 мм
	216,3	$4p^1P - 4d^1D$	»	Условия те же

* Незначительное количество аргона или азота опустошает метастабильный уровень He 2³S, с которого возможно возбуждение на нижний лазерный уровень 4p³P электронным ударом.

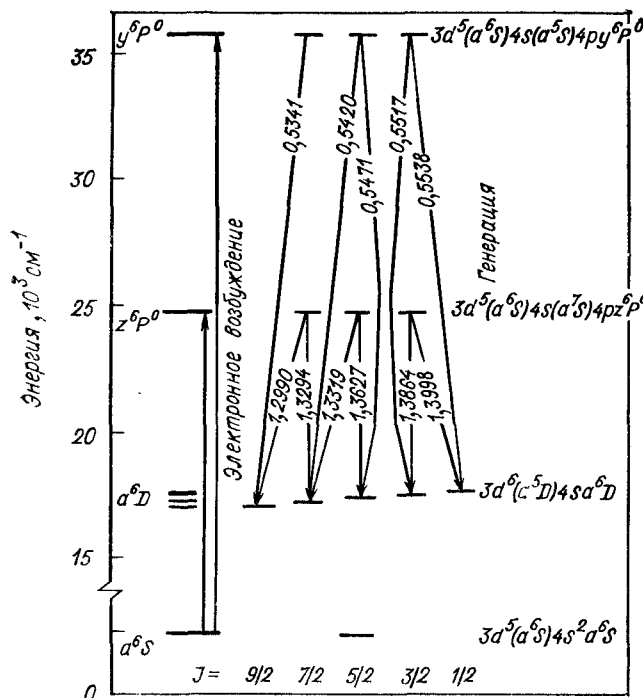
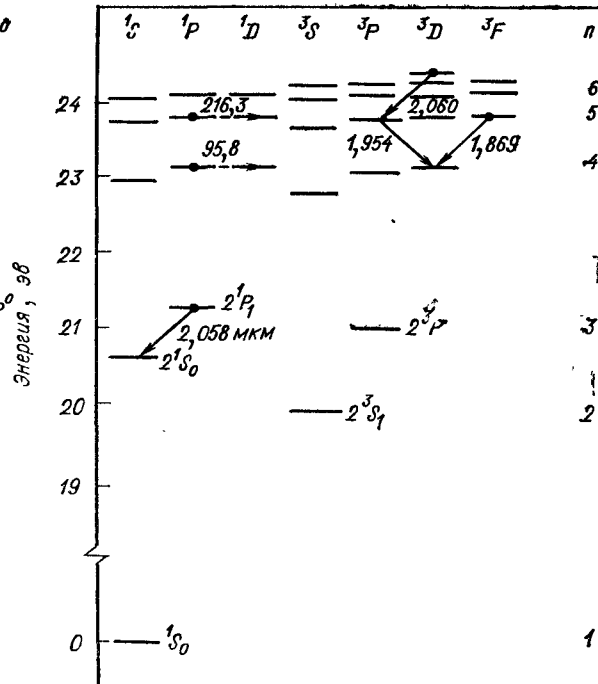


Рис. 33.16. Схема лазерных переходов и электронного возбуждения в парах марганца [1].



Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация		Возбуждение	Примечания
		Рака	Пашена		
0 Неон	0,88653	$4s' [^1/2]_1^0 - 3p [^1/2]_1$	$2s_2 - 2p_{10}$	непр.	Наблюдается в очень длинных разрядных трубках
	0,89886	$4s' [^1/2]_0^0 - 3p [^1/2]_1$	$2s_3 - 2p_{10}$	»	Условия те же
	0,9486	$4s [^3/2]_1^0 - 3p [^1/2]_1$	$2s_4 - 2p_{10}$	имп.	В смеси неона с водородом*
	0,9665	$4s [^3/2]_2^0 - 3p [^1/2]_1$	$2s_5 - 2p_{10}$	»	Условия те же
	1,0295	$4s' [^1/2]_1^0 - 3p [^5/2]_2$	$2s_2 - 2p_8$	непр.	Наблюдается в очень длинных разрядных трубках
	1,0621	$4s' [^1/2]_1^0 - 3p [^3/2]_1$	$2s_2 - 2p_7$	»	2,8 мм рт. ст. смеси He—Ne, парциальное давление неона 0,15 мм рт. ст., $D = 5 \div 10 \text{ мм}^2$ *
	1,0798	$4s' [^1/2]_0^0 - 3p [^3/2]_1$	$2s_3 - 2p_7$	»	В смеси He—Ne (10:1), $PD = 10 \text{ мм рт. ст.} \cdot \text{мм}$
	1,0844	$4s' [^1/2]_1^0 - 3p [^3/2]_2$	$2s_2 - 2p_6$	»	Условия те же
	1,1143	$4s [^3/2]_1^0 - 3p [^5/2]_2$	$2s_4 - 2p_8$	»	Как для линии 1,0798 мкм. Наблюдается также в чистом неоне и смеси неона с водородом
	1,1177	$4s [^3/2]_2^0 - 3p [^5/2]_3$	$2s_5 - 2p_9$	»	Условия те же
	1,1390	$4s [^3/2]_2^0 - 3p [^5/2]_2$	$2s_5 - 2p_8$	»	Как для линии 1,0798 мкм
	1,1409	$4s' [^1/2]_1^0 - 3p' [^3/2]_1$	$2s_2 - 2p_5$	»	Как для линии 1,1143 мкм
	1,15228	$4s' [^1/2]_1^0 - 3p' [^3/2]_2$	$2s_2 - 2p_4$	»	Самая сильная из линий $2s - 2p$ -перехода. В смеси He—Ne (10:1) $PD = 11 \text{ мм рт. ст.} \cdot \text{мм}$
	1,15250	$4s [^3/2]_1^0 - 3p [^3/2]_1$	$2s_4 - 2p_7$	»	Тлеющий разряд в чистом неоне, оптимум PD меньше 0,5 мм рт. ст. $\cdot$ мм
	1,1602	$4s' [^1/2]_1^0 - 3p [^1/2]_0$	$2s_2 - 2p_3$	»	В смеси He—Ne
	1,1614	$4s [^1/2]_0^0 - 3p' [^3/2]_1$	$2s_3 - 2p_5$	»	Условия те же
	1,1767	$4s' [^1/2]_1^0 - 3p' [^1/2]_1$	$2s_2 - 2p_2$	»	Как для линии 1,1143 мкм
	1,1789	$4s [^3/2]_1^0 - 3p [^3/2]_2$	$2s_4 - 2p_6$	»	В очень длинных разрядных трубках в смеси неона и водорода
	1,1985	$4s' [^1/2]_0^0 - 3p' [^1/2]_1$	$2s_3 - 2p_2$	»	В смеси He—Ne
	1,2066	$4s [^3/2]_0^0 - 3p [^3/2]_2$	$2s_5 - 2p_6$	»	В смеси He—Ne
	1,2460	$4s [^3/2]_1^0 - 3p' [^3/2]_1$	$2s_4 - 2p_5$	»	В очень длинных разрядных трубках в смеси неона и водорода
	1,2586	$5f [^9/2]_{4,5} - 3d [^7/2]_4^0$	$5V - 3d_1'$	имп. 2*	0,2 мм рт. ст. неона, 3—4 мм рт. ст. гелия, $D = 5,2 \text{ мм}$
	1,2594	$4s [^3/2]_1^0 - 3p' [^3/2]_2$	$2s_4 - 2p_4$	»	В смеси гелия и водорода
	1,2689	$4s [^3/2]_1^0 - 3p [^1/2]_0$	$2s_4 - 2p_3$	непр.	Как для линии 1,2460 мкм
	1,2767	$4s [^3/2]_2^0 - 3p' [^3/2]_1$	$2s_5 - 2p_5$	»	Условия те же
	1,2887	$4s [^3/2]_1^0 - 3p' [^1/2]_1^0$	$2s_4 - 2p_2$	»	В очень длинных разрядных трубках в смеси He—Ne
	1,2912	$4s [^3/2]_2^0 - 3p' [^3/2]_2$	$2s_5 - 2p_4$	»	Как для линии 1,2460 мкм
	1,3912	$4s [^3/2]_2^0 - 3p' [^1/2]_1$	$2s_5 - 2p_2$	имп.	В смеси неона и водорода
	1,5231	$4s' [^1/2]_1^0 - 3p' [^1/2]_0$	$2s_2 - 2p_1$	непр.	Как для линии 1,0798 мкм
	1,6405	$6s [^3/2]_2^0 - 4p [^5/2]_3$	$4s_5 - 3p_9$	имп. 2*	0,2 мм рт. ст. неона, 3—4 мм рт. ст. гелия, $D = 5,2 \text{ мм}$
	1,7161	$4s [^3/2]_1^0 - 3p' [^1/2]_0$	$2s_4 - 2p_1$	непр.	Как для линии 1,2887 мкм
	1,8210	$4p' [^1/2]_1 - 4s [^3/2]_1^0$	$3p_1 - 2s_4$	»	Условия те же

* Для генерации на этой линии необходимо подавление генерации на других линиях перехода $2s - 2p$.

** Оптическая накачка гелиевой лампой.

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация		Возбуждение	Примечания
		Рака	Пашена		
Г Неон	1,8281	$4f [^3/2]_{3,5} - 3d [^7/2]_4^0$	$4f - 3d'_4$	непр	В смеси He — Ne (10:1) $PD = 8$ мм рт. ст. · мм
	1,8287	$4f [^3/2]_4 - 3d [^7/2]_3^0$	$4V - 3d_4$	»	} Условия те же
	1,8309	$4f [^5/2]_{2,3} - 3d [^3/2]_2^0$	$4Y - 3d_3$	»	
	1,8408	$4f [^5/2]_2 - 3d [^3/2]_1^0$	$4Y - 3d_2$	»	В смеси He — Ne (100:1) $PD = 8$ мм рт. ст. · мм
	1,8596	$4f [^7/2]_3 - 3d [^3/2]_2^0$	$4Z - 3d'_1$	»	Как для линии 1,8281 мкм
	1,8602	$4f [^7/2]_{3,4} - 3d [^3/2]_3^0$	$4Z - 3d'_1$	»	Условия те же
	1,9574	$4p' [^3/2]_2 - 4s' [^3/2]_2^0$	$4p_4 - 2s_5$	»	В смеси He — Ne. Также в чистом неоне, $PD = 0,1 - 0,5$ мм рт. ст. · мм
	1,9577	$4p' [^1/2]_1 - 4s [^3/2]_2^0$	$3p_2 - 2s_5$	»	В смеси He — Ne
	2,0350	$4p' [^3/2]_2 - 4s [^3/2]_1^0$	$3p_4 - 2s_4$	»	Как для линии 1,9574 мкм
	2 0356	$4p' [^1/2]_1 - 4s [^3/2]_1^0$	$3p_2 - 2s_4$	»	В смеси He — Ne
	2 1019	$4d' [^5/2]_2^0 - 4p [^3/2]_2$	$4s'''' - 3p_6(?)$	»	В очень длинных разрядных трубках
	2,1041	$4p' [^1/2]_0 - 4s' [^1/2]_1^0$	$3p_1 - 2s_2$	»	Как для линии 1,9577 мкм
	2,1708	$4p [^1/2]_0 - 4s [^3/2]_1^0$	$3p_3 - 2s_4$	»	0,05 мм. рт. ст. чистого неона
	2,326	$4p [^5/2]_2 - 4s [^3/2]_2^0$	$3p_8 - 2s_5$	»	В длинных разрядных трубках В чистом неоне или смеси He—Ne
	2,3951	$4p' [^3/2]_2 - 4s [^1/2]_1^0$	$3p_4 - 2s_2$	»	В смеси He — Ne или в чистом неоне
	2,3956	$4p' [^1/2]_1 - 4s [^1/2]_1^0$	$3p_2 - 2s_2$	»	0,6 мм рт. ст. смеси He — Ne (5:1), $D = 8$ мм
	2,42	$5s' [^1/2]_1^0 - 4p [^1/2]_1$	$3s_2 - 3p_{10}$	»	0,86 мм рт. ст. смеси He — Ne (13:1), $D = 22$ мм
	2,4226	$4d [^3/2]_1^0 - 4p [^5/2]_2$	$4d_2 - 3p_8$	»	В длинной разрядной трубке 0,15 мм рт. ст. неона, $D = 15$ мм
	2,4250	$4p' [^3/2]_1 - 4s' [^3/2]_1^0$	$3p_5 - 2s_2$	»	В смеси He — Ne
	2,5400	$4d [^1/2]_1^0 - 4p [^3/2]_2$	$4d_5 - 3p_1$	»	0,01—0,2 мм рт. ст. неона, 0,0—1,0 мм рт. ст. гелия, $D = 10$ мм
	2,5524	$4p [^1/2]_1 - 4s [^3/2]_2^0$	$3p_{10} - 2s_5$	»	В длинной разрядной трубке, в чистом неоне или в смеси He — Ne, $D = 10$ мм
	2,7582	$4d [^3/2]_1^0 - 4p [^1/2]_0$	$4d_2 - 3p_3$	»	Как для линии 2,5400 мкм
	2,7826	$5s' [^1/2]_0^0 - 4p [^3/2]_1$	$3s_3 - 3p_7$	»	} Условия те же
	2,864	$4d' [^3/2]_1^0 - 4p' [^3/2]_2$	$4s'_1 - 3p_4$	»	
	2,9456	$5s [^3/2]_1^0 - 4p [^1/2]_1$	$3s_4 - 3p_{10}$	»	
	2,9676	$4d [^3/2]_1^0 - 4p' [^3/2]_1$	$4d_5 - 3p_7$	»	
	2,9813	$4d [^3/2]_2^0 - 4p' [^3/2]_1$	$4d_3 - 3p_5$	»	
	3,0268	$4d [^3/2]_2^0 - 4p' [^1/2]_1$	$4d_3 - 3p_2$	»	
	3,0726	$5s' [^1/2]_1^0 - 4p [^1/2]_0$	$3s_2 - 3p_3$	»	

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация		Возбужденне	Примечания
		Рака	Пашена		
0 Неон	3,3182	$5s[3/2]_1^0 - 4p[5/2]_2$	$3s_4 - 3p_8$	непр.	Как для линии 2,5400 мкм
	3,3342	$5s'[1/2]_1^0 - 4p'[3/2]_1$	$3s_2 - 3p_5$	»	Условия те же
	3,3362	$5s[3/2]_2^0 - 4p[5/2]_3$	$3s_6 - 3p_6$	»	
	3,3813	$7s'[1/2]_0^0 - 5p'[3/2]_1$	$5s_3 - 4p_5$	»	
	3,3840	$7s'[1/2]_0^0 - 5p'[1/2]_1$	$5s_3 - 4p_2$	»	
	3,3903	$5s'[1/2]_1^0 - 4p'[1/2]_1$	$3s_2 - 3p_2$	»	
	3,3913	$5s'[1/2]_1^0 - 4p'[3/2]_2$	$3s_2 - 3p_4$	»	В смеси Нс—Не (5:1) $PD = 3,6$ мм рт. ст. мм
	3,4481	$5s[3/2]_1^0 - 4p[3/2]_1$	$3s_4 - 3p_7$	»	В смеси Нс—Не (5:1) $PD = 3,6$ мм рт. ст. мм
	3,5845	$5s[3/2]_2^0 - 4p[3/2]_2$	$3s_6 - 3p_6$	»	Очень большой коэффициент уси- ления
	3,7746	$4p'[1/2]_0 - 3d[3/2]_1^0$	$3p_1 - 3d_2$	»	Как для линии 2,5400 мкм
	3,9817	$5s[3/2]_1^0 - 4p[1/2]_0$	$3s_4 - 3p_3$	»	Условия те же
	4,2183	$5s'[1/2]_1^0 - 4p'[1/2]_0$	$3s_2 - 3p_1$	»	
	5,4048	$4p'[1/2]_0 - 3d'[3/2]_1^0$	$3p_1 - 3s_1$	»	
	5,6667	$4p[1/2]_0 - 3d[3/2]_1^0$	$3p_3 - 3d_2$	»	
	7,3228	$6s[3/2]_2^0 - 5p[5/2]_3$	$4s_6 - 4p_9$	»	
	7,4211	$6s'[1/2]_0^0 - 5p'[1/2]_1$ или $6s'[1/2]_0^0 - 5p'[3/2]_1$	$4s_3 - 4p_2(?)$ или $4s_3 - 4p_6$	»	Условия те же
	7,4237	$5p'[1/2]_1 - 4d[3/2]_2$	$4p_2 - 4d_3$	»	
	7,4799	$4p[3/2]_2 - 3d[5/2]_2^0$	$3p_6 - 3d_1$	»	
	7,4994	$6s[3/2]_2^0 - 5p[5/2]_2$	$4s_6 - 4p_8$	»	
	7,5313	$6s[3/2]_1^0 - 5p[3/2]_1$	$4s_4 - 4p_7$	»	
	7,6163	$4p[3/2]_1 - 3d[5/2]_2^0$	$3p_7 - 3d_1$	»	0,15 мм рт. ст. неона, 0,3 мм рт. ст. гелия, $D = 15$ мм
	7,6461	$5p'[3/2]_1 - 4d[5/2]_2^0$	$4p_6 - 4d_1$	»	Условия те же
	7,6510	$4p[5/2]_2 - 3d[7/2]_3^0$	$3p_8 - 3d_4$	»	
	7,6925	$4p'[3/2]_2 - 3d'[5/2]_2^0$	$3p_4 - 3s_1$	»	
	7,7015	$4p'[3/2]_2 - 3d'[5/2]_3^0$	$3p_4 - 3s_1''$	»	
	7,7407	$4p[5/2]_2 - 3d[3/2]_2^0$	$3p_6 - 3d_3$	»	
	7,7655	$4p'[1/2]_1 - 3d'[3/2]_2^0$	$3p_2 - 3s_4$	»	Условия те же
	7,7815	$6s[3/2]_2^0 - 5p[3/2]_1$	$4s_6 - 4p_7$	»	
	7,8368	$6s[3/2]_2^0 - 5p[3/2]_2$	$4s_6 - 4p_6$	»	
	8,0088	$4p'[3/2]_1 - 3d'[5/2]_2^0$	$3p_6 - 3s_1'''$	»	
	8,0621	$4p[5/2]_3 - 3d[7/2]_4^0$	$3p_8 - 3d_4$	»	
	8,3370	$4p'[5/2]_2 - 3d[5/2]_2^0$	$3p_6 - 3d_1'$	»	Условия те же
	8,8413	$4p[5/2]_3 - 3d[5/2]_2^0$	$3p_6 - 3d_1'$	»	
	9,0533	$6s[3/2]_1^0 - 5p[1/2]_0$	$4s_4 - 4p_3$	»	
	или 9,0896			»	

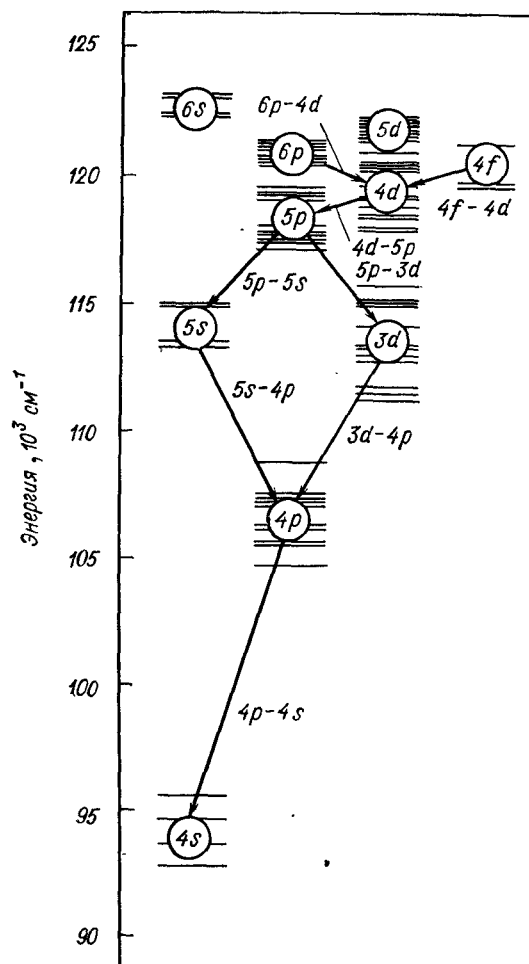
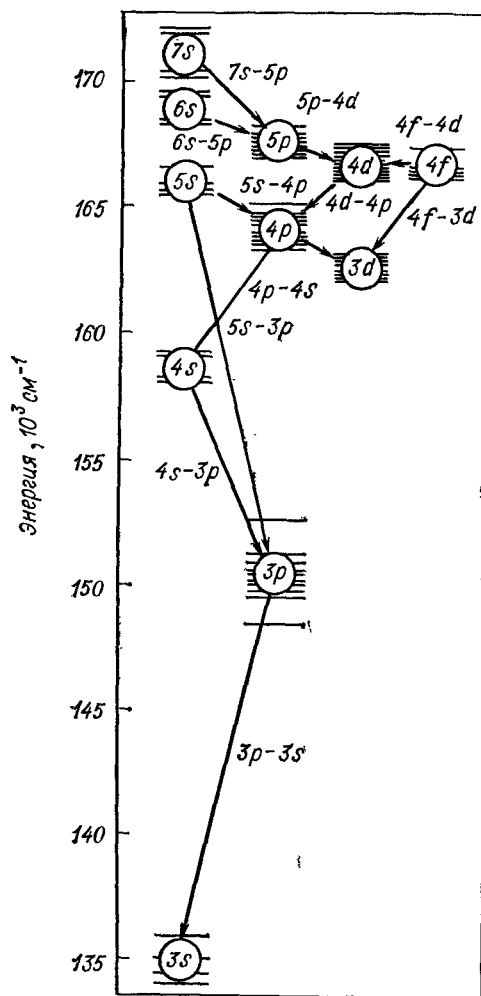


Рис. 33.18. Схема основных групп лазерных переходов в неоне [1].

Рис. 33.19. Схема основных групп лазерных переходов в аргоне [1].

Продолжение табл. 33.1

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация		Возбуждение	Примечания
		Рака	Пашена		
0					
Неон	10,0637	$4p\ [^1_2]_1 - 3d[^1_2]_1^0$	$3p_{10} - 3d_5$	непр.	0,01—0,2 мм рт. ст. неона, 0,1—1,0 мм рт. ст. гелия, D = 10 мм
	10,981	$4p[^1_2]_1 - 3d[^3_2]_2^0$	$3p_{10} - 3d_3$	»	
	11,861	$5p[^1_2]_1 - 5s'[^1_2]_0^0$	$4p_{10} - 3s_5$	»	
	11,902	$5p[^1_2]_0 - 4d[^3_2]_1^0$	$4p_3 - 4d_2$	»	
	12,835	$5p[^1_2]_0 - 4d'[^3_2]_1^0$	$4p_1 - 4s_1$	»	
	13,759	$7s'[^1_2]_1^0 - 6p'[^3_2]_2$	$5s_2 - 5p_4$	»	
		или			
		$4d'[^3_2]_3^0 - 4f[^5_2]_3$	$4s_1^* - 4Y$		
	14,930	—	—	»	
	16,638	$5p[^3_2]_2 - 4d[^5_2]_2^0$	$4p_6 - 4d_1''$	»	

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация		Возбуждение	Примечания
		Рака	Пашеиа		
0 Неон	16,668	$5p[{}^3/2]_2 - 4d[{}^5/2]_3^0$	$4p_6 - 4d'_1$	непр.	0,01—0,2 мм рт. ст. неона, 0,0—1,0 мм рт. ст. гелия, $D = 10$ мм
	16,893	$5p[{}^3/2]_1 - 4d[{}^5/2]_2^0$	$4p_7 - 4d''_1$	»	
	16,947	$5p[{}^5/2]_2 - 4d[{}^7/2]_3^0$	$4p_8 - 4d_4$	»	
	17,158	$5p'[{}^3/2]_2 - 4d' [{}^5/2]_3^0$	$4p_4 - 4s_1''''$	»	
	17,189	$5p'[{}^3/2]_2 - 4d' [{}^3/2]_2^0$	$4p_4 - 4s''_1$	»	
	17,804	$5p'[{}^1/2]_1 - 4d' [{}^3/2]_2^0$	$4p_2 - 4s'_1$	»	
	17,841	$5p'[{}^3/2]_1 - 4d' [{}^5/2]_2^0$	$4p_5 - 4s_1''''$	»	
	17,888	$5p[{}^5/2]_3 - 4d[{}^7/2]_4^0$	$4p_9 - 4d'_1$	»	
	18,396	$5p[{}^5/2]_2 - 4d[{}^5/2]_2^0$	$4p_8 - 4d'_1$	»	
	20,480	$6p[{}^1/2]_0 - 5d[{}^1/2]_1^0$	$5p_3 - 5d_6$	»	
	21,752	$6p[{}^1/2]_0 - 5d[{}^3/2]_1^0$	$5p_3 - 5d_2$	»	
	22,836	$5p[{}^1/2]_1 - 4d[{}^3/2]_2^0$	$4p_{10} - 4d_3$	»	
	25,423	$6p'[{}^1/2]_0 - 5d' [{}^3/2]_1^0$	$5p_1 - 5s'_1$	»	
	28,053	$6p[{}^3/2]_1 - 5d[{}^1/2]_0^0$	$5p_7 - 5d_6$	»	
	31,553	$6p[{}^3/2]_2 - 5d[{}^5/2]_3^0$	$5p_5 - 5d'_1$	»	
	31,928	$6p[{}^3/2]_1 - 5d[{}^5/2]_2^0$	$5p_7 - 5d'_1$	»	В чистом неоне $P=0,05$ мм рт. ст., $D=21$ мм
	32,016	$6p[{}^5/2]_2 - 5d[{}^7/2]_3^0$	$5p_8 - 5d_4$	»	
	32,516	$6p'[{}^3/2]_2 - 5d' [{}^5/2]_3^0$	$5p_4 - 5s_1''''$	»	0,01—0,2 мм рт. ст. неона, 0—1,0 мм рт. ст. гелия, $D = 10$ мм
	33,824	$6p'[{}^3/2]_1 - 5d' [{}^5/2]_2^0$	$5p_5 - 5s_1''''$	»	
	или	или	или	»	
	33,837	$6p[{}^5/2]_3 - 5d[{}^7/2]_4^0$	$5p_9 - 5d'_1$	»	
	34,552	$6p'[{}^1/2]_1 - 5d' [{}^3/2]_2^0$	$5p_2 - 5s'_1$	»	
	34,679	$6p[{}^5/2]_2 - 5d[{}^5/2]_2^0$	$5p_8 - 5d'_1$	»	
	35,602	$7p[{}^1/2]_0 - 6d[{}^3/2]_1^0$	$6p_3 - 6d_2$	»	
	37,231	$7p'[{}^1/2]_0 - 6d' [{}^3/2]_1^0$	$6p_1 - 6s_1$	»	
	41,741	$6p[{}^1/2]_1 - 5d[{}^3/2]_2^0$	$5p_{10} - 5d_3$	»	
	50,705	$7p[{}^3/2]_2 - 6d[{}^3/2]_2^0$	$6p_6 - 6d_3$	»	
	52,425	$7p'[{}^1/2]_1 - 6d' [{}^3/2]_2^0$	$6p_2 - 6s'_1$	»	В чистом неоне $P=0,02$ мм рт. ст., $D=47$ мм
					Условия те же
					Условия те же

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация		Возбуждение	Примечания
		Рака	Пашена		
0 Неон	53,486	$7p [^3/2]_2 - 6d [^5/2]_3^0$	$6p_6 - 6d'_1$	непр.	Как для линии 34,679 мкм
	54,019	$7p [^3/2]_1 - 6d [^5/2]_2^0$	$6p_7 - 6d'_1$	»	0,05 мм рт. ст. неона, 0,1 мм рт. ст. гелия, $D = 21$ мм
	54,117	$7p [^5/2]_2 - 6d [^7/2]_3^0$	$6p_8 - 6d_4$	»	Условия те же
	55,537	$7p' [^3/2]_1 - 6d' [^5/2]_2^0$	$6p_6 - 6s'_1$	»	Как для линии 52,425 мкм
	57,355	$7p [^5/2]_3 - 6d [^7/2]_4^0$	$6p_9 - 6d'_4$	»	0,03 мм рт. ст. неона, 0,07 мм рт. ст. гелия, $D = 21$ мм
	68,329	$7p [^1/2]_1 - 6d [^3/2]_2^0$	$6p_{10} - 6d_3$	»	В чистом неоне $P = 0,035$ мм рт.ст., $D = 21$ мм
	72,108	$8p' [^1/2]_0 - 7d' [^3/2]_1^0$	$7p_1 - 7s'_1$	»	Как для линии 52,425 мкм
	85,010	$8p [^3/2]_2 - 7d [^5/2]_3^0$	$7p_6 - 7d'_1$	»	В чистом неоне $P = 0,035$ мм рт.ст., $D = 21$ мм
	86,962	$8p' [^3/2]_2 - 7d [^5/2]_2^0$	$7p_4 - 7s'_1$	»	} Условия те же
	88,471	$8p [^3/2]_1 - 7d [^5/2]_2^0$	$7p_9 - 7d'_1$	»	
	89,859	$8p [^5/2]_3 - 7d [^7/2]_3^0$	$7p_9 - 7d_4$	»	
	93,02	—	—	»	В чистом неоне $P = 0,01$ мм рт.ст., $D = 47$ мм
	106,07	$10p [^1/2]_0 - 9d [^3/2]_1^0$	$9p_3 - 9d_2$	»	} Условия те же
	124,52	$9p [^3/2]_1 - 8d [^5/2]_2^0$	—	»	
	или	или	—	»	
	124,76	$9p [^3/2]_2 - 8d [^5/2]_3^0$	—	»	
	126,1	—	—	»	} Условия те же
	132,8	—	—	»	
Аргон 'рис. 33.19)	0,706721	$4p' [^3/2]_2 - 4s [^3/2]_2^0$	$2p_3 - 1s_5$	кор. имп.	В смеси аргона с неоном (гелием) (0,001—0,02) мм рт. ст. аргона, $D = 3$ мм
	0,7503	$4p' [^1/2]_0 - 4s' [^1/2]_1^0$	$2p_1 - 1s_2$	»	
	0,8780	—	—	имп.	
	1,0935	—	—	»	Условия те же
	1,213962	$3d' [^3/2]_1^0 - 4p' [^3/2]_1$	$3s'_1 - 2p_4$	»	0,03 мм рт. ст. аргона, $D = 3$ мм
	1,240275	$3d [^3/2]_1^0 - 4p [^3/2]_1$	$3d_2 - 2p_7$	»	} Условия те же
	1,270221	$3d' [^3/2]_1^0 - 4p' [^1/2]_1$	$3s'_1 - 2p_2$	»	
	1,3472	$7d [^3/2]_2^0 - 5p [^3/2]_2$	$7d_3 - 3p_6$	непр.	0,25 мм рт. ст. аргона, $D = 2,2$ мм
	1,4093640	$3d [^3/2]_1^0 - 4p [^1/2]_0$	$3d_2 - 2p_5$	имп.	0,04 мм рт. ст. аргона, $D = 7$ мм
	1,618	$5s [^3/2]_2^0 - 4p' [^3/2]_2$	$2s_5 - 2p_3$	непр.	0,05 мм рт. ст. аргона, $D = 7$ мм
	1,694058	$3d [^3/2]_2^0 - 4p [^3/2]_2$	$3d_3 - 2p_6$	»	2,5 мм рт. ст. аргона, $D = 7$ мм
	1,791437	$3d [^1/2]_1^0 - 4p [^3/2]_3$	$3d_5 - 2p_6$	»	0,035 мм рт. ст. аргона, $D = 7$ мм
		или	или		
		$3d [^1/2]_0^0 - 4p [^3/2]_1$	$3d_6 - 2p_7$	»	

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация		Возбуждение	Примечания
		Рака	Пашена		
0 Аргон					
	1,8167	$3d [^7/2]_4^0 - 4p [^5/2]_3$	$3d'_4 - 2p_0$	непр.	
	2,0616	$3d [^3/2]_2^0 - 4p' [^3/2]_2$	$3d_3 - 2p_3$	»	0,035 мм рт. ст. аргона, $D = 7$ мм
	2,0986	$3d [^1/2]_1^0 - 4p [^1/2]_0$	$3d_6 - 2p_6$	»	0,012 мм рт. ст. аргона
	2,133	$3d [^1/2]_1^0 - 4p' [^3/2]_1$	$3d_6 - 2p_4$	»	0,01—0,05 мм рт. ст. аргона, $D = 10$ мм
	2,1534	$3d [^3/2]_2^0 - 4p' [^1/2]_1$	$3d_3 - 2p_2$	»	0,018 мм рт. ст. аргона
	2,2044	$3d [^1/2]_1^0 - 4p' [^3/2]_1$	$3d_6 - 2p_4$	»	0,01—0,05 мм рт. ст. аргона, $D = 10$ мм
	или	или	или		
	2,2083	$3d [^1/2]_1^0 - 4p' [^3/2]_2$	$3d_6 - 2p_3$		
	2,313320	$3d [^1/2]_1^0 - 4p' [^1/2]_1$	$3d_6 - 2p_2$	»	} Условия те же
	2,3973	$3d [^1/2]_1^0 - 4p' [^1/2]_1$	$3d_6 - 2p_2$	»	
	2,5014	$6d' [^3/2]_2^0 - 6p [^1/2]_1$	$6s'_1 - 4p_{10}$	»	0,01—0,05 мм рт. ст. аргона, $D = 10$ мм
	2,5494	$5d [^5/2]_3 - 3d [^7/2]_3^0$	$3p_0 - 3d_4$	»	
	2,5512	$5p [^1/2]_0 - 5s [^3/2]_1^0$	$3p_6 - 2s_4$	»	
	2,5634	$6d' [^3/2]_2^0 - 6p [^5/2]_3$	$6s_1 - 4p_9$	»	
	2,5668	$5p' [^1/2]_0 - 5s' [^1/2]_1^0$	$3p_1 - 2s_2$	»	
	2,6843	$5p [^3/2]_1 - 3d [^5/2]_2^0$	$3p_7 - 3d_1$	»	
	2,7364	$5p' [^1/2]_1 - 3d' [^3/2]_2^0$	$3p_2 - 3s_1$	»	
	2,8202	$5p' [^3/2]_1 - 5s' [^1/2]_0^0$	$3p_4 - 2s_3$	»	
	или	или	или		
		$5p [^3/2]_2 - 5s [^3/2]_1^0$	$3p_6 - 2s_4$		
	2,8783	$5p [^5/2]_3 - 5s [^3/2]_2^0$	$3p_0 - 2s_6$	»	} Условия те же
	2,8843	$5p [^3/2]_2 - 3d [^5/2]_3^0$	$3p_6 - 3d_1$	»	
	2,9280	$5p [^1/2]_0 - 3d [^3/2]_1^0$	$3p_6 - 3d_2$	»	
	2,9796	$5p [^5/2]_2 - 5s [^3/2]_1^0$	$3p_8 - 2s_4$	»	
	3,0462	$5p [^5/2]_2 - 3d [^5/2]_3^0$	$3p_8 - 3d_1$	»	
	3,0996	$5p [^5/2]_3 - 3d [^5/2]_3^0$	$3p_0 - 3d_1$	»	
	3,1333	$5p [^1/2]_1 - 5s [^3/2]_2^0$	$3p_{10} - 2s_6(?)$	»	
	3,1346	$6p' [^3/2]_1 - 4d [^5/2]_2^0$	$4p_3 - 4d_1$	»	
	4,7330	$5p [^1/2]_1 - 3d' [^3/2]_1^0$	$3p_{10} - 3s_1$	»	
	4,9160	$6p' [^3/2]_2 - 4d' [^3/2]_2^0$	$4p_3 - 4s_1$	»	
	4,9213	$5d [^5/2]_2^0 - 4f [^7/2]_3$	$5d'_1 - 4U$	»	
	5,1216	$6p [^5/2]_3 - 4d [^7/2]_3$	$4p_0 - 4d_4$	»	
	5,1218	$5d [^7/2]_3^0 - 4f [^9/2]_4$	$5d_4 - 4V$	»	0,05 мм рт. ст. аргона, $D = 15$ мм
	5,4680	$5d [^7/2]_4^0 - 4f [^9/2]_6$	$5d'_4 - 4V$	»	} Условия те же
	или	или	или		
	5,4694	$5d [^7/2]_4^0 - 4f [^9/2]_4$	$5d'_4 - 4V$	»	
	5,8477	$6p [^1/2]_0 - 6s [^3/2]_1^0$	$4p_6 - 3s_4$	»	
	5,8666	$6p [^3/2]_2 - 4d [^5/2]_3^0$	$4p_6 - 4d_1$	»	0,01—0,05 мм рт. ст. аргона, $D = 10$ мм

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация		Возбуждение	Примечания
		Рака	Пашена		
0 Аргон	6,0531	$4d [^1/2]_1^0 - 5p [^5/2]_2$	$4d_5 - 3p_8$	непр.	Условия те же
	6,9429	$4d [^3/2]_1^0 - 5p' [^3/2]_1$	$4d_2 - 3p_4$	»	
	6,9448	$6p' [^1/2]_1 - 6s' [^1/2]_1^0$	$4p_2 - 3s_2$	»	
	7,2166	$6p [^1/2]_1 - 6s [^3/2]_2^0$	$4p_{10} - 3s_5$	»	0,05 мм рт. ст. аргона
	7,8003	$4f [^3/2]_2 - 4d [^3/2]_2^0$	$4X_2 - 4d_3$	»	
	или	или	или		Условия те же
	7,8023	$4f [^3/2]_1 - 4d [^3/2]_2^0$	$4X_1 - 4d_3$	»	
	7,8063	$7s' [^1/2]_1^0 - 4p' [^1/2]_1$	$4s_2 - 2p_2$	»	
	12,141	$4d' [^3/2]_1^0 - 4f [^3/2]_{1,2}$	$4s_1 - 4X$	»	Условия те же
	или				
	12,146				0,01—0,05 мм рт. ст. аргона, D = 10 мм
	15,037	$5d' [^3/2]_2^0 - 5f [^5/2]_3$	$5s_1 - 5Y$	»	
	или				Условия те же
	15,042				
	26,944	$4d' [^3/2]_2^0 - 4f [^5/2]_3$	$4s_1 - 4Y$	»	Условия те же
	0,3050	—	—	имп.	
	0,8104365	$5p [^5/2]_2 - 5s [^3/2]_2^0$	$2p_8 - 1s_5$	кор. имп.	0,1 мм рт. ст. криптона, D = 3 мм
	0,8589	—	—	имп.	
Криптон (рис. 33.20)	1,1457481	$6s [^3/2]_1^0 - 5p [^1/2]_1$	$2s_4 - 2p_{10}$	»	0,04 мм рт. ст. криптона, D = 7 мм
	1,3177412	$6s [^3/2]_1^0 - 5p [^5/2]_2$	$2s_4 - 2p_8$	»	
	1,3622416	$4d [^3/2]_1^0 - 5p [^5/2]_2$	$3d_2 - 2p_8$	»	0,03 мм рт. ст. криптона, D = 7 мм
	1,4426793	$6s [^3/2]_1^0 - 5p [^3/2]_1$	$2s_4 - 2p_7$	»	
	1,4765471	$6s [^3/2]_1^0 - 5p [^3/2]_2$	$2s_4 - 2p_8$	»	0,2 мм рт. ст. криптона, D = 7 мм
	1,6853498	$4d [^7/2]_3^0 - 5p [^5/2]_3$	$3d_4 - 2p_9$	»	
	1,689677	$4d [^1/2]_1^0 - 5p [^1/2]_1$	$3d_5 - 2p_{10}$	»	0,08 мм рт. ст. криптона, D = 7 мм
	1,694	$4d [^5/2]_2^0 - 5p [^3/2]_1$	$3d_1 - 2p_7$	непр.	
	1,784	$4d [^1/2]_0^0 - 5p [^1/2]_1$	$3d_6 - 2p_{10}$	»	0,07 мм рт. ст. криптона, D = 7 мм
	1,819	$4d' [^5/2]_2^0 - 5p' [^3/2]_2$	$3s_1'''' - 2p_2$	»	
	1,921	$8s [^3/2]_1^0 - 6p [^5/2]_2$	$4s_5 - 3p_8$	»	0,035 мм рт. ст. криптона, D = 7 мм

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация		Возбуждение	Примечания
		Рака	Пашена		
0 Криптон					
	2,1171	$4d [^3/2]_2^0 - 5p [^3/2]_1$	$3d_3 - 2p_7$	непр.	} Условия те же
	2,1902532	$4d [^3/2]_2^0 - 5p [^3/2]_2$	$3d_3 - 2p_6$	»	
	2,42587	$4d [^1/2]_1^0 - 5p [^3/2]_1$	$3d_5 - 2p_7$	»	
	2,523385	$4d [^1/2]_1^0 - 5p [^3/2]_2$	$3d_5 - 2p_6$	»	
	2,6267	$4d [^1/2]_0^0 - 5p [^3/2]_1$	$3d_6 - 2p_7$	»	1,0 мм рт. ст. криптона, D = 7 мм
	2,6288	$7p [^3/2]_2 - 4d' [^5/2]_2^0$	$4p_6 - 3s_1'''' (?)$	»	0,02 мм рт. ст. криптона, D = 10 мм
	2,8618	$6p [^5/2]_2 - 6s [^3/2]_2^0$	$3p_8 - 2s_5$	»	0,03 мм рт. ст. криптона, D = 5 мм
	или	или	или		0,02 мм рт. ст. криптона, D = 10 мм
	2,8655	$6p [^5/2]_3 - 6s [^3/2]_2^0$	$3p_9 - 2s_5$	»	} Условия те же
	2,9845	$6p' [^1/2]_1 - 5d [^5/2]_2^0$	$3p_8 - 4d_1''$	»	
	2,9878	$6p' [^3/2]_1 - 6s' [^1/2]_0^0$	$3p_4 - 2s_3$	»	
	3,0536	$6p' [^3/2]_1 - 5d [^5/2]_2^0$	$3p_4 - 4d_1''$	»	
	3,0672	$6p [^1/2]_1 - 6s [^3/2]_2^0$	$3p_{10} - 2s_5$	»	0,02 мм рт. ст. криптона, D = 10 мм
	3,1515	$6p' [^1/2]_0 - 5d [^3/2]_1^0$	$3p_1 - 4d_2$	»	0,03 мм рт. ст. криптона, D = 15 мм
	3,3409	$6p [^1/2]_1 - 6s [^3/2]_1^0$	$3p_{10} - 2s_4$	»	0,02 мм рт. ст. криптона, D = 10 мм
	3,3419	$4d [^1/2]_1^0 - 5p [^1/2]_0$	$3d_5 - 2p_5$	»	0,03 мм рт. ст. криптона, D = 15 мм
	3,4680	$7s [^3/2]_1^0 - 6p [^1/2]_1$	$3s_4 - 3p_{10}$	»	} Условия те же
	3,4883	$7s [^3/2]_2^0 - 6p' [^1/2]_1$	$3s_5 - 3p_3$	»	
	3,4895	$5d [^3/2]_1^0 - 6p' [^1/2]_1$	$4d_2 - 3p_3$	»	
	4,3748	$5d [^3/2]_1^0 - 6p [^3/2]_2$	$4d_2 - 3p_6$	»	0,03 мм рт. ст. криптона, D = 15 мм
	4,3767	$7s [^3/2]_2^0 - 6p [^3/2]_2$	$3s_5 - 3p_6$	»	Условия те же
	4,8773	$4d [^3/2]_1^0 - 5p' [^3/2]_1$	$3d_2 - 2p_4$	»	} Условия те же
	4,8832	$5d [^5/2]_2^0 - 6p [^5/2]_3$	$4d_1'' - 3p_9$	»	
	5,3000	$5d [^3/2]_1^0 - 6p [^1/2]_0$	$4d_2 - 3p_5$	»	
	или	или	или		0,02 мм рт. ст. криптона, D = 10 мм
	5,3019	$5d [^3/2]_2^0 - 6p [^5/2]_2$	$4d_3 - 3p_8$	»	} Условия те же
	5,5700	$5d [^7/2]_3^0 - 6p [^5/2]_2$	$4d_4 - 3p_6$	»	
	5,5863	$6d [^7/2]_4^0 - 4f [^9/2]_5$	$5d_4' - 4U$	»	
	5,6306	$6d [^3/2]_2^0 - 4f [^5/2]_3$	$5d_3 - 4T$	»	Условия те же
	7,0581	$4f [^7/2]_{3,4} - 5d [^7/2]_4^0$	$4W - 4d_4$	»	0,02 мм рт. ст. криптона, D = 10 мм

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация		Возбуждение	Примечания
		Рака	Пашена		
0 Ксенон (рис. 33.21)	0,840919	$6p [^3/2]_1 - 6s [^3/2]_2^0$	$2p_7 - 1s_5$	кор. имп.	0,04 мм рт. ст. ксенона, $D = 7$ мм
	0,904545	$6p [^5/2]_2 - 6s [^3/2]_2^0$	$2p_9 - 1s_5$	»	0,12 мм рт. ст. ксенона
	0,97997	$6p [^1/2]_1 - 6s [^3/2]_2^0$	$2p_{10} - 1s_5$	имп.	0,2—0,4 мм рт. ст. ксенона
	1,0634	—	—	»	0,001—0,02 мм рт. ст. ксенона, $D = 3,0$ мм
	1,0950	—	—	»	Условия те же
	1,365701	$7s [^3/2]_1^0 - 6p [^5/2]_2$	$2s_4 - 2p_9$	»	0,04 мм рт. ст. ксенона, $D = 7$ мм
	1,605327	$7s [^3/2]_1^0 - 6p [^3/2]_2$	$2s_4 - 2p_6$	»	0,1 мм рт. ст. ксенона, $D = 7$ мм
	1,732578	$5d [^3/2]_1^0 - 6p [^5/2]_2$	$3d_2 - 2p_8$	»	0,03—0,1 мм рт. ст. ксенона, $D = 5$ мм
	2,026229	$5d [^3/2]_1^0 - 6p [^3/2]_1$	$3d_2 - 2p_7$	непр.	10 мм рт. ст. смеси He—Xe (100:1), $D = 5$ мм

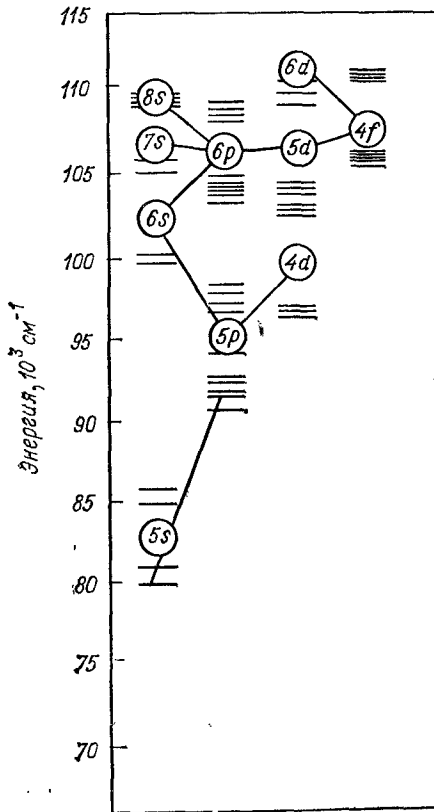


Рис. 33.20. Схема основных групп лазерных переходов в кryptonе [1].

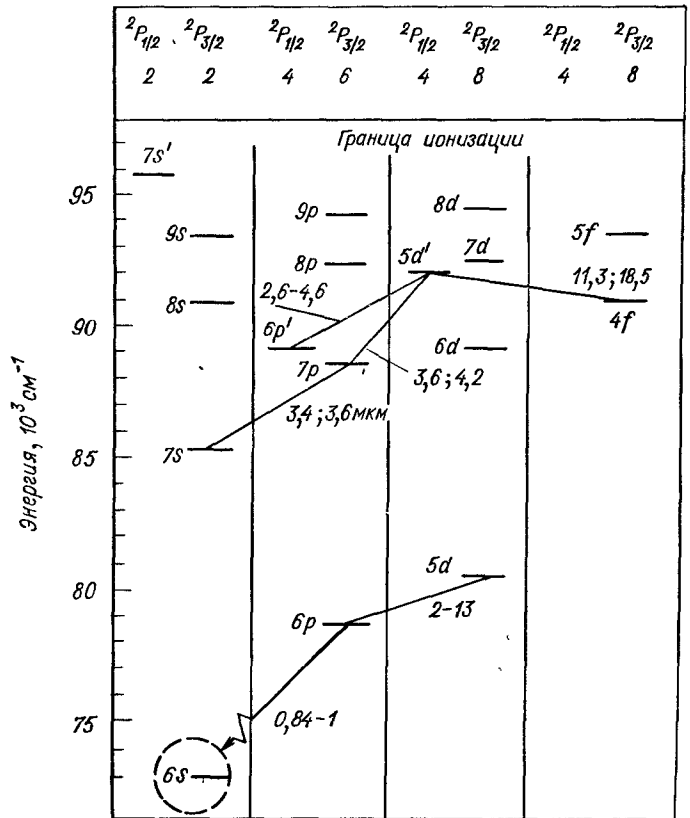


Рис. 33.21. Схема основных групп лазерных переходов в ксеноне [1].

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Идентификация		Возбуждение	Примечания
		Рака	Пашена		
0 Ксенон	2,3200	$5d [^5/2]_3^0 - 6p [^5/2]_2$	$3d'_1 - 2p_9$	непр.	0,01—0,04 мм рт. ст. ксенона, 1 мм рт. ст. гелия, $D = 7$ мм
	2,4825	$5d [^5/2]_3^0 - 6p [^5/2]_3$	$3d'_1 - 2p_8$	»	0,03—0,1 мм рт. ст. ксенона, $D = 5$ мм
	2,6276	$5d [^5/2]_2^0 - 6p [^5/2]_2$	$3d''_1 - 2p_9$	»	0,01—0,04 мм рт. ст. ксенона, 1 мм рт. ст. гелия, $D = 7$ мм
	2,651093	$5d [^3/2]_1^0 - 6p [^1/2]_0$	$3d_2 - 2p_6$	»	} Условия те же
	2,6608	$5d' [^3/2]_1^0 - 6p' [^1/2]_0$	$3s'_1 - 2p_1$	»	
	3,1078	$5d [^5/2]_3^0 - 6p [^3/2]_2$	$3d'_1 - 2p_8$	»	
	3,27459	$5d [^3/2]_2^0 - 6p [^1/2]_1$	$3d_3 - 2p_{10}$	»	0,4 мм рт. ст. смеси He—Xe (250:1), $D = 11$ мм
	3,3676	$5d [^5/2]_2^0 - 6p [^3/2]_1$	$3d''_1 - 2p_7$	»	0,01—0,04 мм рт. ст. ксенона, 1 мм рт. ст. гелия, $D = 7$ мм
	3,4345	$7p [^5/2]_2 - 7s [^3/2]_1^0$	$3p_9 - 2s_4$	»	} Условия те же
	3,5080	$5d [^7/2]_3^0 - 6p [^5/2]_2$	$3d_4 - 2p_9$	»	
	3,6219	$5d' [^3/2]_3^0 - 7p [^3/2]_2$	$3s_1'''' - 3p_6$	»	0,01—0,04 мм рт. ст. ксенона, 1,0 мм рт. ст. гелия, $D = 7$ мм
	3,6518	$7p [^1/2]_1 - 7s [^3/2]_2^0$	$3p_{10} - 2s_5$	»	0,02 мм рт. ст. ксенона, $D = 7$ мм
	3,6798	$5d [^1/2]_1^0 - 6p [^1/2]_1$	$3d_5 - 2p_{10}$	»	} Условия те же
	3,6859	$5d [^5/2]_2^0 - 6p [^3/2]_2$	$3d''_1 - 2p_6$	»	
	3,8697	$5d' [^5/2]_3^0 - 6p' [^3/2]_2$	$3s_1'' - 2p_3$	»	} Условия те же
	3,8950	$5d [^7/2]_3^0 - 6p [^5/2]_3$	$3d_4 - 2p_8$	»	
	3,9966	$5d [^1/2]_0^0 - 6p [^1/2]_1$	$3d_6 - 2p_{10}$	»	} Условия те же
	4,1527	$5d' [^5/2]_2^0 - 7p [^3/2]_1$	$3s_1'' - 3p_7$	»	
	4,5393	$5d [^3/2]_2^0 - 6p [^5/2]_2$	$3d_3 - 2p_9$	»	} Условия те же
	4,6109	$5d' [^3/2]_2^0 - 6p' [^1/2]_1$	$3s_1'''' - 2p_2$	»	
	5,3568	$5d [^1/2]_1^0 - 6p [^5/2]_2$	$3d_5 - 2p_9$	»	0,01 мм рт. ст. ксенона, 0,1 мм рт. ст. гелия, $D = 10$ мм
	5,5754	$5d [^7/2]_4^0 - 6p [^5/2]_3$	$3d'_4 - 2p_8$	»	Необходимо подавление генерации на линии 3,508 мкм
	6,384	$8p [^3/2]_2 - 8s [^3/2]_2^0$	$4p_6 - 3s_5$	»	0,01—0,04 мм рт. ст. ксенона, 1,0 мм рт. ст. гелия, $D = 7$ мм
	7,3167	$5d [^3/2]_2^0 - 6p [^3/2]_1$	$3d_3 - 2p_7$	»	0,04 мм рт. ст. ксенона, $D = 6$ мм
	8,191	$8p [^1/2]_1 - 8s [^3/2]_1^0$	$4p_{10} - 3s_4$	»	} Условия те же
	9,0065	$5d [^3/2]_2^0 - 6p [^3/2]_2$	$2d_3 - 2p_6$	»	
	9,7029	$5d [^1/2]_1^0 - 6p [^3/2]_1$	$3d_5 - 2p_7$	»	} Условия те же
	11,299	$8p [^3/2]_1^0 - 5d' [^3/2]_2$	$4p_7 - 3s_1'''$	»	
		или $5d' [^5/2]_3^0 - 4f [^9/2]_4$	или $3s_1'''' - 4Z$		} Условия те же
	12,266	$5d [^1/2]_0^0 - 6p [^3/2]_1$	$3d_6 - 2p_7$	»	
	12,917	$5d [^1/2]_1^0 - 6p [^3/2]_2$	$3d_5 - 2p_6$	»	} Условия те же
	18,506	$5d' [^3/2]_2^0 - 4f [^5/2]_3$	$3s_1''' - 4U$	»	
	75,5778	$6p' [^3/2]_1 - 5d [^1/2]_1^0$	$2p_5 - 3d_5$	»	3,5 мм рт. ст. смеси He—Xe (100:1), $D = 6$ мм

33.2. ИОННЫЕ ЛАЗЕРЫ

Инверсная населенность и генерация на ионизованных атомах в газовом разряде получена на переходах, принадлежащих 29 элементам. Так как для работы лазеров данного типа требуется значительная ионизация, пороговые плотности тока через разряд значительно выше, чем для лазеров на нейтральных атомах. Процесс создания инверсии обычно протекает в две ступени: сначала электронным ударом вызывается ионизация, а затем уже происходит возбуждение ионов в верхнее лазерное состояние. Механизмы возбуждения на второй ступени во многом подобны механизмам, описанным в разд. 33.1.

Лазерные переходы в ионных лазерах приведены в табл. 33.2 и объединены по группам элементов, указанным на рис. 33.22.

В таблице даны: длины волн спонтанных переходов (звездочкой слева помечены сильные или характеристические линии иона), идентификация иона (II — для однократно-, III — для двукратноионизованного атома

и т. д.), спектроскопическая идентификация лазерного, перехода, в которой указаны верхний и нижний уровни, а также терм атомного остатка (в скобках) данного перехода (случаи сомнительной идентификации обозначены знаком «?» или прочерком). Возбуждение указано сокращенно: непр. — для данного перехода генерация получена в непрерывном режиме работы, послесв. — генерация наблюдается только в послесвечении разрядного импульса.

Для ряда наиболее важных ионных лазеров в данном разделе приводятся энергетические диаграммы основных переходов. Причем обозначение электронных конфигураций, уровней и термов атомных остатков соответствует таблицам [2]. Все длины волн на рисунках приведены в нанометрах (нм). Шкалы энергии даны в обратных сантиметрах (слева) и в электронвольтах (справа). В этих же единицах приведены ионизационные потенциалы лазерных ионов (и. п.). Лазерные переходы, для которых возможны различные идентификации, вместе сплошных линий на рисунках обозначены штрихами.

Таблица 33.2

Лазерные переходы в ионизованных газах [3]

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Измеренное значение, мкм	Ион	Уровни	Возбуждение
				верхний — нижний	
IIA					
	Кальций	0,854209	Ca II	(1S) 4p $^2P_{3/2}^0$ — (1S) 3d $^2D_{5/2}$	—
		0,866214	Ca II	(1S) 4p $^2P_{1/2}^0$ — (1S) 3d $^2D_{3/2}$	—
	Стронций	1,033014	Sr II	(1S) 5p $^2P_{3/2}^0$ — (1S) 4d $^2D_{5/2}$	послесв.
		1,091797	Sr II	(1S) 5p $^2P_{1/2}^0$ — (1S) 4d $^2D_{3/2}$	»
IIIB					
	Цинк	0,491160	Zn II	(1S) 4f $^2F_{5/2}^0$ — (1S) 4d $^2D_{3/2}$	—
		0,492404	Zn II	(1S) 4f $^2F_{7/2}^0$ — (1S) 4d $^2D_{5/2}$	непр.
		*0,589442	Zn II	4s ^{2} $^2D_{3/2}$ — (1S) 4p $^2P_{1/2}^0$	»
		0,610253	Zn II	(1S) 5d $^2D_{5/2}$ — (1S) 5p $^2P_{3/2}^0$	»
		*0,747879	Zn II	4s ^{2} $^2D_{5/2}$ — (1S) 4p $^2P_{3/2}^0$	непр.
		0,758848	Zn II	(1S) 5p $^2P_{3/2}^0$ — (1S) 5s $^2S_{1/2}$	»
		0,761290	Zn II	(1S) 6s $^2S_{1/2}$ — (1S) 5p $^2P_{1/2}^0$	—
		0,775786	Zn II	(1S) 6s $^2S_{1/2}$ — (1S) 5p $^2P_{3/2}^0$	—
	Кадмий (рис. 33.23)	*0,325031	Cd II	5s ^{2} $^2D_{3/2}$ — (1S) 5p $^2P_{1/2}^0$	непр.
		*0,441563	Cd II	5s ^{2} $^2D_{5/2}$ — (1S) 5p $^2P_{3/2}^0$	»
		0,488172	Cd II	(3D) 5p $^4F_{5/2}^0$ — (1S) 5d $^2D_{3/2}$	»
		0,502548	Cd II	(3D) 5p $^4F_{7/2}^0$ — (1S) 5d $^2D_{5/2}$	»
		*0,533749	Cd II	(1S) 4f $^2F_{5/2}^0$ — (1S) 5d $^2D_{3/2}$	»
		0,537804	Cd II	(1S) 4f $^2F_{7/2}^0$ — (1S) 5d $^2D_{5/2}$	»
		0,635480	Cd II	(1S) 6g $^2G_{7/2}$ — (1S) 4f $^2F_{9/2}^0$	»

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Измеренное значение, мкм	Ион	Уровни	Возбуждение
				верхний — нижний	
II B Кадмий (рис. 33.23)	0,636004	0,636010	Cd II	$(^1S)6g\ ^2G_{7/2} - (^1S)4f\ ^2F_{7/2}^0$	непр.
	0,723689	0,723690	Cd II	$(^1S)6f\ ^2F_{5/2}^0 - (^1S)6d\ ^2D_{3/2}$	»
	0,728423	0,728430	Cd II	$(^1S)6f\ ^2F_{7/2}^0 - (^1S)6d\ ^2D_{5/2}$	»
	0,806687	0,806690	Cd II	$(^1S)6p\ ^2P_{3/2}^0 - (^1S)6s\ ^2S_{1/2}$	»
	0,839002	0,839000	Cd II?	$?[(^1S)11p\ ^2P_{1/2}^0 - (^1S)8s\ ^2S_{1/2}]$	—
	1,18636	1,186900	Cd II?	$?[(^1S)10d\ ^2D_{3/2} - (^8D)5p\ ^2D_{5/2}^0]$	—
Ртуть (рис. 33.24)	0,479701	$0,479700 \pm 10$	Hg II	$5d^8\ 6s^2(J=4) - 5d^8(^2D_{5/2})\ 6p_{1/2}(J=3)$	—
	*0,56773	0,567800	Hg II	$(^1S)5f\ ^2F_{7/2}^0 - (^1S)6d\ ^2D_{5/2}$	—
	*0,614947	0,615000	Hg II	$(^1S)7p^2\ P_{3/2}^0 - (^1S)7s\ ^2S_{1/2}$	непр.
	0,73466	0,734600	Hg II	$(^1S)7d\ ^2D_{3/2} - (^1S)7p\ ^2P_{3/2}^0$	—
	0,74181	0,741810	Hg II	$^2P_{3/2}^0(109189) - (^1S)7s\ ^2S_{1/2}$	—
	*0,79447	0,794500	Hg II	$(^1S)7p\ ^2P_{1/2}^0 - (^1S)7s\ ^2S_{1/2}$	непр.
	0,85498	0,854700	Hg II	$(^1S)5g\ ^2G_{7/2} - ^2F_{5/2}^0(121960)$	—
	0,86220	0,862800	Hg II?	$?(^1S)8p\ ^2P_{3/2}^0 - 116200(J=5/2)$	—

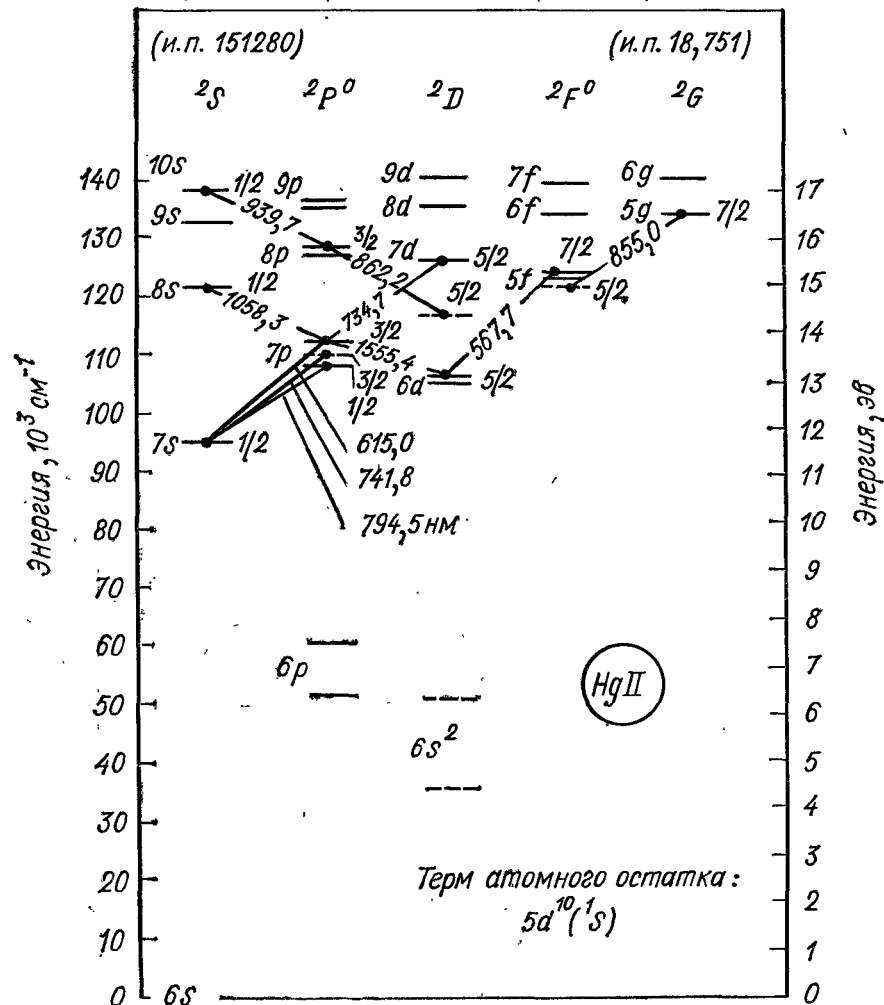


Рис. 33.24. Схема энергетических уровней и лазерных переходов в ртути Hg II [3]. Уровни, соответствующие возбужденным электронам, обозначены штрихами. J указано только для лазерных уровней.

Группа, элемент ☞	Длина волны, мкм	Измеренное значение, мкм	Ион	Уровни	Возбуж- дение	
				верхний — нижний		
IIВ Ртуть (рис 33.24)	0,8677	0,867700	Hg II?	—	—	
	0,93968	0,939600	Hg II	$(1S)10s\ 2S_{1/2} - (1S)8p\ 2P_{3/2}^0$	—	
	1,0583	1,058600	Hg II	$(1S)8s\ 2S_{1/2} - (1S)7p\ 2P_{3/2}^0$	—	
	1,117686	1,117682 ± 10	Hg I	(Линия нейтрального атома)	—	
	1,2545	1,254500	Hg II?	—	—	
	1,2981	1,298100	Hg II?	—	—	
	1,3655	1,365500	Hg II?	—	—	
	1,5554	1,555000	Hg II	$(1S)7p\ 2P_{3/2}^0 - (1S)6d\ 2D_{5/2}$	—	
IIIА Бор	0,345134	0,345132	B II	$2p^2\ 1D_2 - (2S)\ 2p\ 1P_1^0$	—	
	0,468082	0,468050 ± 70	In II	$(2S)\ 4f\ 3F_4^0 - (2S)5d\ 3D_3$	—	
	Индий					
IVА	Углерод	0,464745	0,464740 ± 04	C III	$(2S)\ 3p\ 3P_2^0 - (2S)\ 3s\ 3S_1$	—
		0,465016	0,465021 ± 04	C III	$(2S)\ 3p\ 3P_1^0 - (2S)3s\ 3S_1$	—
	Кремний	0,408889	0,408890 ± 10	Si IV	$4p\ 2P_{3/2}^0 - 4s\ 2S_{1/2}$	—
		0,455262	0,455259 ± 06	Si III	$(2S)4p\ 3P_2^0 - (2S)4s\ 3S_1$	—
		0,456782	0,456784 ± 06	Si III	$(2S)4p\ 3P_1^0 - (2S)4s\ 3S_1$	—
		0,634710	0,634724 ± 06	Si II	$(1S)4p\ 2P_{3/2}^0 - (1S)\ 4s\ 2S_{1/2}$	посл.св.
		0,637136	0,637148 ± 06	Si II	$(1S)4p\ 2P_{1/2}^0 - (1S)\ 4s\ 2S_{1/2}$	—
		0,667188	0,667193 ± 06	Si II	$(3P^0)4p\ 4D_{7/2} - (3P^0)\ 4s\ 4P_{5/2}^0$	—
	Германий	0,513175	0,513150 ± 70	Ge II	$(1S)\ 4f\ 2F_{5/2}^0 - (1S)\ 4d\ 2D_{3/2}$	—
		0,517865	0,517840 ± 70	Ge II	$(1S)\ 4f\ 2F_{7/2}^0 - (1S)\ 4d\ 2D_{5/2}$	—
	Олово	0,579918	0,579870 ± 70	Sn II	$(1S)4f\ 2F_{7/2}^0 - (1S)\ 5d\ 2D_{5/2}$	—
		0,645350	0,645300 ± 70	Sn II	$(1S)6p\ 2P_{3/2}^0 - (1S)\ 6s\ 2S_{1/2}$	непр.
		0,657926	0,657903 ± 06	Sn	—	—
		0,684405	0,684400 ± 70	Sn II	$(1S)6p\ 2P_{1/2}^0 - (1S)\ 6s\ 2S_{1/2}$	непр.
	Свинец	0,53721	0,537210 ± 70	Pb II	$(1S)5f\ 2F_{7/2}^0 - 6s6p^2\ 4P_{5/2}$	—
		0,56089	0,56086 ± 50	Pb II	$(1S)7p\ 2P_{3/2}^0 - (1S)\ 7s\ 2S_{1/2}$	—
		0,66599	0,66601 ± 50	Pb II	$(1S)7p\ 2P_{1/2}^0 - (1S)\ 7s\ 2S_{1/2}$	—
VA Азот	0,336734	0,336732 ± 06	N III	$(3P^0)3p\ 4P_{5/2} - (3P^0)\ 3s\ 4P_{5/2}^0$	—	
	0,347867	0,347876 ± 05	N IV	$(2S)3p\ 3P_2^0 - (2S)3s\ 3S_1$	—	
	0,348296	0,348302 ± 06	N IV	$(2S)3p\ 3P_1^0 - (2S)\ 3s\ 3S_1$	—	
	0,399501	0,399499 ± 02	N II	$(2P^0)3p\ 1D_2 - (2P^0)\ 3s\ 1P_1^0$	—	
	0,409732	0,409729 ± 06	N III	$(1S)3p\ 2P_{3/2}^0 - (1S)\ 3s\ 2S_{1/2}$	—	
	0,410338	0,410336 ± 02	N III	$(1S)3p\ 2P_{1/2}^0 - (1S)\ 3s\ 2S_{1/2}$	—	

Группа. элемент	Длина волны, мкм	Измеренное значение, мкм	Ион	Уровень	Возбужде- ние
				верхний — нижний	
VA					
Азот	0,451088	0,451045 ± 23	N III	$(^3P^0)3p\ ^4D_{3/2} - (^3P^0)3s\ ^4P^0_{3/2}$	—
	0,451487	0,451486 ± 03	N III	$(3p^0)3p\ ^4D_{7/2} - (^3P^0)3s\ ^4P^0_{5/2}$	—
	0,462140	0,462100 ± 80	N II	$[(^2P^0)3p\ ^3P_0 - (^2P^0)3s\ ^3P^0_1]$	—
	0,463055	0,463051 ± 02	N II	$[(^2P^0)3p\ ^3P_2 - (^2P^0)3s\ ^3P^0_2]$	—
	0,464310	0,464390 ± 80	N II	$[(^2P^0)3p\ ^3P_1 - (^2P^0)3s\ ^3P^0_2]$	—
	0,566663	0,566662 ± 03	N II	$(^2P^0)3p\ ^3D_2 - (^2P^0)3s\ ^3P^0_1$	—
	0,567601	0,567603 ± 03	N II	$(^2P^0)3p\ ^3D_1 - (^2P^0)3s\ ^3P^0_0$	—
	*0,567956	0,567953 ± 03	N II	$(^2P^0)3p\ ^3D_3 - (^2P^0)3s\ ^3P^0_2$	—
	0,568622	0,568690 ± 80	N II	$[(^2P^0)3p\ ^3D_1 - (^2P^0)3s\ ^3P^0_1]$	—
Фосфор	0,648207	0,648260 ± 60	N II	$(^2P^0)3p\ ^1P_1 - (^2P^0)3s\ ^1P_1$	—
	0,334769	0,334776 ± 06	P IV	$(^2S)4p\ ^3P^0_2 - (^2S)4s\ ^3S_1$	—
	0,422208	0,422225 ± 06	P III	$(^1S)4p\ ^2P^0_{3/2} - (^1S)4s\ ^2S_{1/2}$	—
	*0,602421	0,602427 ± 06	P II	$(^2P^0)4p\ ^3D_2 - (^2P^0)4s\ ^3P^0_1$	непр.
	0,603421	0,603419 ± 06	P II	$(^2P^0)4p\ ^3D_1 - (^2P^0)4s\ ^3P^0_0$	—
	*0,604325	0,604322 ± 06	P II	$(^2P^0)4p\ ^3D_3 - (^2P^0)4s\ ^3P^0_2$	непр.
	0,608786	0,608804 ± 06	P II	$(^2P^0)4p\ ^3D_1 - (^2P^0)4s\ ^3P^0_1$	—
	0,616577	0,616574 ± 06	P II	$(^2P^0)4p\ ^3D_2 - (^2P^0)4s\ ^3P^0_2$	—
	0,784563	0,784600	P II	$(^2P^0)4p\ ^1P_1 - (^2P^0)4s\ ^1P^0_1$	—
Мышьяк	0,54980	0,549800 ± 100	As II	$(^2P^0)5p\ ^3D_1 - (^2P^0)5s\ ^3P^0_0$	—
	0,55583	0,555900 ± 100	As II	$(^2P^0)5p\ ^3D_2 - (^2P^0)5s\ ^3P^0_1$	—
	0,56516	0,565200 ± 100	As II	$(^2P^0)5p\ ^3D_3 - (^2P^0)5s\ ^3P^0_2$	—
	0,61703	0,617100 ± 100	As II	$(^2P^0)5p\ ^1P_1 - (^2P^0)5s\ ^3P^0_1$	—
Сурьма	0,61299	0,613000 ± 100	Sb II	$(^2P^0)6p\ ^3D_3 - (^2P^0)6s\ ^3P^0_2$	—
Висмут	0,456084	0,456070 ± 10	Bi III	$6s^2(^1S)7p\ ^2P^0_{1/2} - 6s^2(^1S)7s\ ^2S_{1/2}$	—
	0,571921	0,571920 ± 10	Bi II	$6p_{1/2}7p_{1/2}\ ^3P^0_0 - 6p_{1/2}7s\ ^3P^0_1$	—
	0,75990	0,759870 ± 50	Bi III	$6s^2(^1S)6f\ ^2F^0_{5/2} - 6s^2(^1S)7d\ ^2D_{3/2}$	—
	0,80689	0,806920 ± 50	Bi III	$6s^2(^1S)6f\ ^2F^0_{7/2} - 6s^2(^1S)7d\ ^2D_{5/2}$	—
VIA					
Кислород	*0,298378	0,298386 ± 06	O III	$(^2P^0)3p\ ^1D_2 - (^2P^0)3s\ ^1P^0_1$	—
	0,304713	0,304715 ± 06	O III	$(^2P^0)3p\ ^3P_2 - (^2P^0)3s\ ^3P^0_2$	—
	0,306345	0,306346 ± 06	O IV	$(^1S)3p\ ^2P^0_{3/2} - (^1S)3s\ ^2S_{1/2}$	—
	0,33813	0,338134 ± 06	O IV	$(^3P^0)3p\ ^4D_{3/2} - (^3P^0)3s\ ^4P^0_{1/2}$	—
			или		
			O IV	$(^3P^0)3p\ ^4D_{5/2} - (^3P^0)3s\ ^4P^0_{3/2}$	—
	0,338554	0,338554 ± 06	O IV	$(^3P^0)3p\ ^4D_{1/2} - (^3P^0)3s\ ^4P^0_{5/2}$	—
	0,374949	0,374947 ± 04	O II	$(^3P)3p\ ^4S^0_{3/2} - (^3P)3s\ ^4P^0_{5/2}$	—
	0,375467	0,375468 ± 04	O III	$(^2P^0)3p\ ^3D_2 - (^2P^0)3s\ ^3P^0_1$	—

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Измеренное значение, мкм	Ион	Уровни	Возбуж- дение
				верхний — нижний	
VI A Кислород	0,375988	0,375989 ± 05	O III	$(^2P^0)3p\ ^3D_3 - (^2P^0)3s\ ^3P^0_2$	—
	*0,434738	0,434738 ± 04	O II	$(^1D)3p\ ^2D^0_{3/2} - (^1D)3s\ ^2D_{3/2}$	—
	*0,435128	0,435123 ± 04	O II	$(^1D)3p\ ^3D^0_{5/2} - (^1D)3s\ ^2D_{5/2}$	—
	*0,441488	0,441493 ± 04	O II	$(^3P)3p\ ^2D^0_{5/2} - (^3P)3s\ ^2P_{3/2}$	—
	*0,441697	0,441697 ± 04	O II	$(^3P)3p\ ^2D^0_{3/2} - (^3P)3s\ ^2P_{1/2}$	—
	0,460552	0,460552 ± 09	O	—	—
	0,464914	0,464908 ± 10	O II	$(^3P)3p\ ^4D^0_{1/2} - (^3P)3s\ ^4P_{5/2}$	—
	0,559237	0,559237 ± 06	O III	$(^2P^0)3p\ ^1P_1 - (^2P^0)3s\ ^1P^0_1$	—
	0,664099	0,664020 ± 100	O II	$(^3P)3p\ ^2S^0_{1/2} - (^3P)3s\ ^2P_{1/2}$	—
	0,672136	0,672138 ± 04	O II	$(^3P)3p\ ^2S^0_{1/2} - (^3P)3s\ ^2P_{3/2}$	—
Сера	0,263898	0,263898 ± 06	S V	—	—
	0,332486	0,332486 ± 06	S III	$(^2P^0)4p\ ^3P_2 - (^2P^0)3d\ ^3P^0_2$	—
	0,349737	0,349737 ± 06	S III	—	—
	0,370937	0,370941 ± 06	S III	$(^2P^0)4p\ ^3D_2 - (^2P^0)3d\ ^3P^0_1$	—
	0,492532	0,492560 ± 06	S II	$(^3P)4p\ ^4P^0_{3/2} - (^3P)4s\ ^4P_{1/2}$	—
	0,501401	0,501424 ± 06	S II	$(^3P)4p\ ^2P^0_{3/2} - (^3P)4s\ ^2P_{3/2}$	—
	0,503239	0,503262 ± 06	S II	$(^3P)4p\ ^4P^0_{5/2} - (^3P)4s\ ^4P_{3/2}$	—
	0,516032	0,516032 ± 06	S	—	—
	0,521962	0,521962 ± 06	S	—	—
	*0,532070	0,532088 ± 06	S II	$(^1D)4p\ ^2F^0_{7/2} - (^1D)4s\ ^2D_{5/2}$	непр.
	*0,534567	0,534583 ± 06	S II	$(^1D)4p\ ^2F^0_{5/2} - (^1D)4s\ ^2D_{3/2}$	»
	0,542864	0,542874 ± 06	S II	$(^3P)4p\ ^4D^0_{3/2} - (^3P)4s\ ^4P_{1/2}$	—
	*0,543277	0,543287 ± 06	S II	$(^3P)4p\ ^4D^0_{5/2} - (^3P)4s\ ^4P_{3/2}$	непр.
	*0,545380	0,545388 ± 06	S II	$(^3P)4p\ ^4D^0_{7/2} - (^3P)4s\ ^4P_{5/2}$	»
	0,547360	0,547374 ± 06	S II	$(^3P)4p\ ^4D^0_{1/2} - (^3P)4s\ ^4P_{1/2}$	—
	0,550967	0,550990 ± 06	S II	$(^3P)4p\ ^4D^0_{3/2} - (^3P)4s\ ^4P_{3/2}$	—
	0,556495	0,556511 ± 06	S II	$(^3P)4p\ ^4D^0_{5/2} - (^3P)4s\ ^4P_{5/2}$	—
	*0,563999	0,564012 ± 06	S II	$(^3P)4p\ ^2D^0_{5/2} - (^3P)4s\ ^2P_{3/2}$	непр
	0,564698	0,564716 ± 06	S II	$(^3P)4p\ ^2D^0_{3/2} - (^3P)4s\ ^2P_{1/2}$	—
	0,581919	0,581935 ± 06	S II	$(^3P)4p\ ^2D^0_{3/2} - (^3P)4s\ ^2P_{3/2}$	—
Селен	0,460434	0,460460 ± 50	Se II	$(^3P)5p\ ^2D^0_{5/2} - (^3P)5s\ ^4P_{5/2}$	непр.
	0,464844	0,464860 ± 50	Se II	$(^3P)5p\ ^4P^0_{3/2} - (^3P)5s\ ^4P_{1/2}$	»
	0,476365	0,476410 ± 50	Se II	$(^3P)5p\ ^2D^0_{3/2} - (^3P)5s\ ^4P_{3/2}$	»
	0,484063	0,484060 ± 50	Se II	$(^3P)5p\ ^2S^0_{1/2} - (^3P)5s\ ^4P_{3/2}$	»
	0,484495	0,484500 ± 50	Se II	$(^3P)5p\ ^4S^0_{3/2} - (^3P)5s\ ^4P_{5/2}$	»
	*0,497566	0,497610 ± 50	Se II	$(^3P)5p\ ^2D^0_{5/2} - 4s\ 4p^4\ ^2P_{3/2}$	»
	*0,499275	0,499290 ± 50	Se II	$(^3P)5p\ ^4P^0_{3/2} - (^3P)5s\ ^4P_{3/2}$	»
	*0,506865	0,506870 ± 50	Se II	$(^3P)5p\ ^4P^0_{5/2} - (^3P)5s\ ^4P_{5/2}$	»
	0,509650	0,509610 ± 50	Se II	$(^3P)5p\ ^4D^0_{1/2} - (^3P)4d\ ^4F_{5/2}$	»
	0,514214	0,514190 ± 50	Se II	$(^3P)5p\ ^4D^0_{3/2} - (^3P)5s\ ^4P_{1/2}$	»
	*0,517598	0,517600 ± 50	Se II	$(^3P)5p\ ^4D^0_{5/2} - (^3P)5s\ ^4P_{3/2}$	»

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Измеренное значение, мкм	Ион	Уровни	Возбужде- ние
				верхний—нижний	
VIA Селен	*0,522751	0,522760 ± 50	Se II	$(^3P) 5p\ ^4D_{7/2}^0 - (^3P) 5s\ ^4P_{5/2}$	непр.
	0,525307	0,525260 ± 50	Se II	$(^3P) 5p\ ^2D_{5/2}^0 - (^3P) 5s\ ^2P_{3/2}$	»
	0,525363	0,525320 ± 50	Se II	$(^3P) 5p\ ^4D_{1/2}^0 - (^3P) 5s\ ^4P_{1/2}$	»
	0,527111	0,527130 ± 50	Se II	$? (^3P) 5p\ ^4D_{3/2}^0 - (^3P) 4d\ ^4F_{7/2}$	»
	*0,530535	0,530550 ± 50	Se II	$(^3P) 5p\ ^2D_{3/2}^0 - (^3P) 5s\ ^2P_{1/2}$	»
	0,552242	0,552280 ± 50	Se II	$\left\{ \begin{array}{l} (^3P) 5p\ ^4P_{3/2}^0 - (^3P) 5s\ ^4P_{5/2} \\ \text{или} \\ (^3P) 5p\ ^4P_{5/2}^0 - 4s\ 4p\ ^4P_{3/2} \end{array} \right\}$	»
	0,559116	0,559160 ± 50	Se II	$(^3P) 5p\ ^4P_{3/2}^0 - (^3P) 5s\ ^2P_{1/2}$	»
	0,569788	0,569790 ± 50	Se II	$(^3P) 5p\ ^4D_{1/2}^0 - (^3P) 5s\ ^4P_{3/2}$	»
	0,574762	0,574790 ± 50	Se II	$(^3P) 5p\ ^4D_{3/2}^0 - (^3P) 5s\ ^4P_{5/2}$	»
	0,605596	0,605630 ± 50	Se II	$(^3P) 5p\ ^2P_{3/2}^0 - **$	»
	0,644425	0,644390 ± 50	Se II	$(^3P) 5p\ ^2D_{5/2}^0 - **$	»
	0,649048	0,649010 ± 50	Se II	$(^3P) 5p\ ^4D_{1/2}^0 - (^3P) 5s\ ^2P_{1/2}$	»
	0,653495	0,653460 ± 50	Se II	$(^3P) 5p\ ^2P_{1/2}^0 - **$	»
Теллур	0,54540	0,545400 ± 50	Te II ?	—	—
	0,557634	0,557600 ± 50	Te II	$5s^2\ 5p^2\ (^1D)\ 6p_{7/2}^0 - 94860,95\ (J=5/2)$	—
	0,56405	0,564050 ± 50	Te II ?	—	—
	0,570821	0,570850 ± 50	Te II	$103106,12\ (^{0}_{7/2}) - 85592,36\ (^{6}_{1/2})$	—
	0,593618	0,593650 ± 50	Te II	$99585,02\ (^{0}_{3/2}) - 82743,83\ (^{8}_{3/2})$	послесв.
	0,624549	0,624550 ± 50	Te II	$99585,02\ (^{0}_{3/2}) - 83577,90\ (^{1}_{1/2})$	»
	0,703904	0,703950 ± 50	Te II	$97780,47\ (^{0}_{1/2}) - 83577,90\ (^{1}_{1/2})$	»
VIIA Фтор	0,275958	0,275959 ± 06	F III	$(^1D)\ 3p\ ^2D_{5/2}^0 - (^1D)\ 3s\ ^2D_{5/2}$	—
	0,282613	0,282608 ± 06	F IV	$(^2P^0)\ 3p\ ^3D_3 - (^2P^0)\ 3s\ ^3P_2^0$	—
	0,312151	0,312156 ± 06	F III	$(^3P)\ 3p\ ^4D_{7/2}^0 - (^3P)\ 3s\ ^4P_{5/2}$	—
	0,317413	0,317418 ± 06	F III	$(^3P)\ 3p\ ^2D_{5/2}^0 - (^3P)\ 3s\ ^2P_{3/2}$	—
	0,320275	0,320274 ± 06	F II	$(^2D^0)\ 3p\ ^1D_2 - (^2D^0)\ 3s\ ^1D_2^0$	—
	0,402472	0,402478 ± 06	F II	$(^4S^0)\ 3p\ ^3P_2 - (^4S^0)\ 3s\ ^3S_1^0$	—
Хлор	0,263267	0,263270 ± 06	Cl III	$(^1D)\ 4d\ ^2D_{5/2} - (^1D)\ 4p\ ^2F_{7/2}^0$	—
	0,319146	0,319143 ± 06	Cl III	$(^3P)\ 4p\ ^4S_{3/2}^0 - (^3P)\ 4s\ ^4P_{5/2}$	—
	0,339287	0,339287 ± 06	Cl III	$(^1D)\ 4p\ ^2D_{3/2}^0 - (^1D)\ 4s\ ^2D_{3/2}$	—
	0,339343	0,339345 ± 06	Cl III	$(^1D)\ 4p\ ^2D_{5/2}^0 - (^1D)\ 4s\ ^2D_{5/2}$	—
	0,353004	0,353003 ± 06	Cl III	$(^1D)\ 4p\ ^2F_{7/2}^0 - (^1D)\ 4s\ ^2D_{5/2}$	—
	0,356069	0,356069 ± 06	Cl III	$(^1D)\ 4p\ ^2F_{5/2}^0 - (^1D)\ 4s\ ^2D_{3/2}$	—
	0,360210	0,360210 ± 06	Cl III	$(^3P)\ 4p\ ^4D_{7/2}^0 - (^3P)\ 4s\ ^4P_{5/2}$	—
	0,361283	0,361210 ± 06	Cl III	$(^3P)\ 4p\ ^4D_{5/2}^0 - (^3P)\ 4s\ ^4P_{3/2}$	—
	0,362268	0,362269 ± 06	Cl III	$(^3P)\ 4p\ ^4D_{3/2}^0 - (^3P)\ 4s\ ^4P_{1/2}$	—
	0,372046	0,372046 ± 06	Cl III	$(^3P)\ 4p\ ^2D_{5/2}^0 - (^3P)\ 4s\ ^2P_{3/2}$	—
	0,374882	0,374878 ± 06	Cl III	$(^3P)\ 4p\ ^2D_{3/2}^0 - (^3P)\ 4s\ ^2P_{1/2}$	—

** Классификацию нижних уровней см. в [4].

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Измеренное значение, мкм	Ион	Уровни	Возбужде- ние
				верхний — нижний	
VIIA Хлор	0,413250	0,413250 ± 10	Cl II	$(^2D^0) 4p \ ^1D_2 - (^2D^0) 4s \ ^1D_2^0$	непр.
	0,474042	0,474040 ± 10	Cl II	$(^2P^0) 4p \ ^1P_1 - (^2P^0) 3d \ ^1D_2^0$	»
	0,476871	0,476874 ± 06	Cl II	$(^2P^0) 4p \ ^3D_2 - (^2P^0) 4s \ ^3P_1^0$	»
	0,478134	0,478134 ± 03	Cl II	$(^2P^0) 4p \ ^3D_3 - (^2P^0) 4s \ ^3P_2^0$	»
	0,489685	0,489688 ± 03	Cl II	$(^2D^0) 4p \ ^3F_4 - (^2D^0) 4s \ ^3D_3^0$	»
	0,490482	0,490473 ± 03	Cl II	$(^2D^0) 4p \ ^3F_3 - (^2D^0) 4s \ ^3D_2^0$	»
	0,491781	0,491766 ± 03	Cl II	$(^2D^0) 4p \ ^3F_2 - (^2D^0) 4s \ ^3D_1^0$	»
	0,507828	0,507830 ± 03	Cl II	$(^2D^0) 4p \ ^3D_3 - (^2D^0) 4s \ ^3D_3^0$	»
	0,510310	0,510310 ± 10	Cl II	$(^2D^0) 4p \ ^3D_2 - (^2D^0) 4s \ ^3D_2^0$	»
	*0,521792	0,521790 ± 03	Cl II	$(^4S^0) 4p \ ^3P_2 - (^4S^0) 4s \ ^3S_1^0$	»
	0,522135	0,522130 ± 03	Cl II	$(^4S^0) 4p \ ^3P_1 - (^4S^0) 4s \ ^3S_1^0$	»
	0,539216	0,539215 ± 03	Cl II	$(^2D^0) 4p \ ^1F_3 - (^2D^0) 4s \ ^1D_2^0$	»
	0,609472	0,609474 ± 03	Cl II	$(^2D^0) 4p \ ^1P_1 - (^2D^0) 4s \ ^1D_2^0$	»
Бром	0,474270	0,474266 ± 03	Br II	$(^2P^0) 5p \ ^3D_3 - (^2P^0) 5s \ ^3P_2^0$	—
	0,505465	0,505463 ± 05	Br II	$(^2D^0) 5p \ ^3F_3 - (^4S^0) 4d \ ^3D_2^0$	—
	0,518227	0,518238 ± 02	Br II	$(^4S^0) 5p \ ^3P_2 - (^4S^0) 5s \ ^3S_1^0$	непр.
	0,523823	0,523826 ± 04	Br II	$(^4S^0) 5p \ ^3P_1 - (^4S^0) 5s \ ^3S_1^0$	»
	0,533205	0,533203 ± 03	Br II	$(^2D^0) 5p \ ^1F_3 - (^2D^0) 5s \ ^1D_2^0$	»
	0,611761	0,611756 ± 06	Br II	$(^4S^0) 5p \ ^5P_2 - (^4S^0) 5s \ ^5S_1^0$	—
	0,616870	0,616878 ± 06	Br II	$(^4S^0) 5p \ ^5P_1 - (^4S^0) 5s \ ^5S_1^0$	—
Иод	*0,453379	0,453379 ± 03	I, III, IV?	—	—
	0,467440	0,467440 ± 03	I, III, IV?	—	—
	0,493467	0,493467 ± 03	I, III, IV?	—	—
	0,498692	0,498600	I II	$(^2D^0) 6p \ ^3D_2 - (^4S^0) 5d \ ^3D_1^0$	послесв.
	0,521627	0,521600	I II	$(^2D^0) 6p \ ^3F_2 - (^4S^0) 5d \ ^3D_1^0$	»
	*0,540736	0,540700	I II	$(^2D^0) 6p \ ^3D_2 - (^2D^0) 6s \ ^3D_2^0$	»
	0,562569	0,562500	I II	$(^4S^0) 6p \ ^3P_2 - (^4S^0) 6s \ ^3S_1^0$	—
	*0,567808	0,567800	I II	$(^2D^0) 6p \ ^3F_2 - (^2D^0) 6s \ ^3D_2^0$	послесв.
	*0,576072	0,576000	I II	$(^2D^0) 6p \ ^3D_2 - (^2D^0) 6s \ ^2D_1^0$	»
	0,606893	0,606890	I II	$(^2D^0) 6p \ ^3F_2 - (^2D^0) 6s \ ^3D_1$	—
	*0,612749	0,612700	I II	$(^2D^0) 6p \ ^3D_1 - (^2D^0) 6s \ ^3D_2^0$	послесв.
	0,651618	0,651600	I II	$(^2D^0) 6p \ ^3F_2 - 5s \ 5p \ ^5P_1^0$	—
	*0,658521	0,658500	I II	$(^2D^0) 6p \ ^3D_1 - (^2D^0) 6s \ ^3D_1^0$	послесв.
	0,682523	0,682523	I II	$(^2D^0) 6p \ ^3F_2 - (^2D^0) 6s \ ^3D_3$	—
	0,690477	0,690400	I II	$(^2D^0) 6p \ ^3D_2 - (^2D^0) 6s \ ^1D_2^0$	послесв.
	*0,703299	0,703200	I II	$(^2D^0) 6p \ ^3F_2 - (^2D^0) 5d \ ^3D_2^0$	»
	0,713897	0,713897	I II	$(^2D^0) 6p \ ^3D_2 - (^2D^0) 5d \ ^3D_3$	—
	0,825384	0,825000 ± 10 ⁴	I II	$? (^2D^0) 6p \ ^3D_1 - (^2D^0) 5d \ ^3P_0^0$	послесв.
	0,880423	0,880000 ± 10 ⁴	I II	$? (^2D^0) 6p \ ^3F_2 - (^2D^0) 5d \ ^3F_3^0$	»
	1,04172	1,04172C ± 06	I, III, IV?	—	—

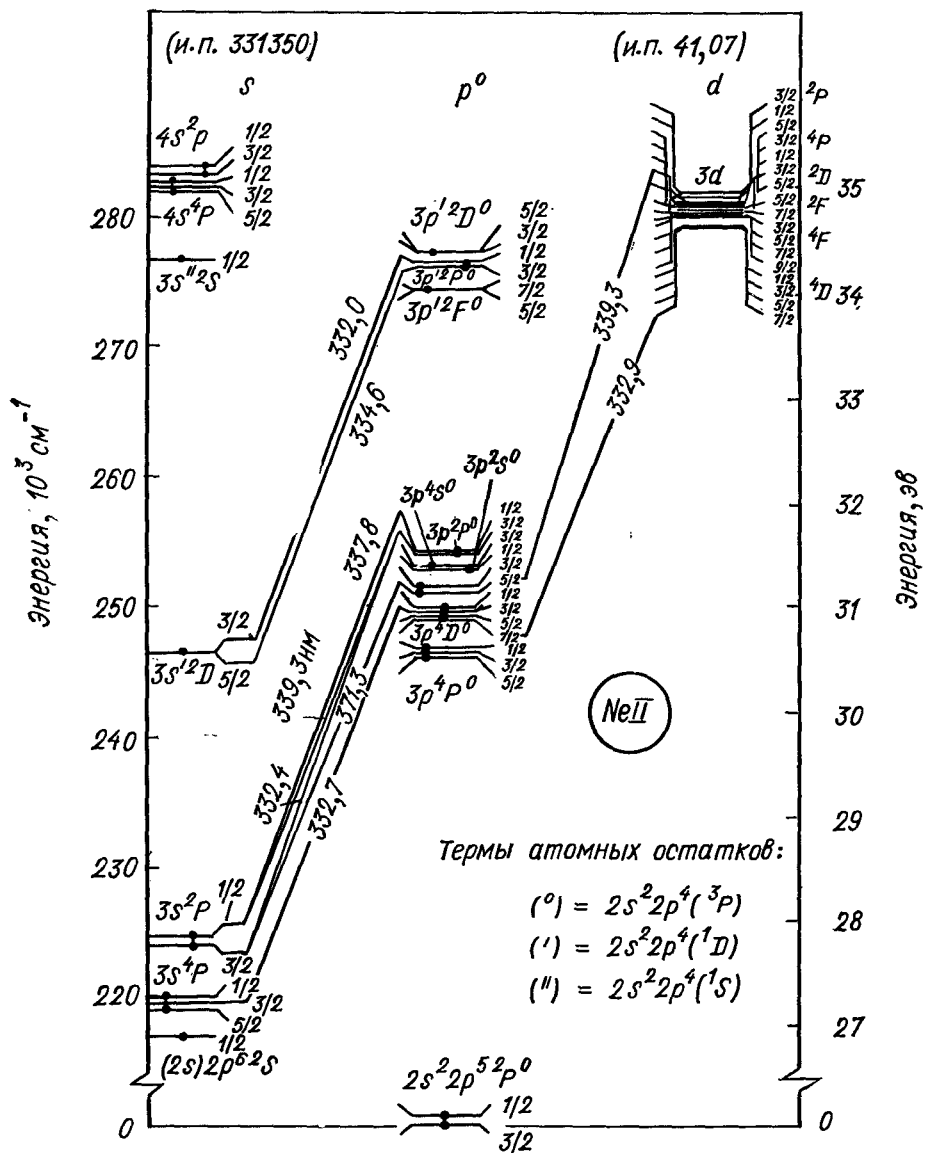


Рис. 33.25. Схема лазерных переходов в Ne II [3].

Продолжение табл. 33.2

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Измеренное значение, мкм	Ион	Уровни	Возбуждение
				верхний—нижний	
0 Неон (рис. 33.25)	0,235796	$0,235800 \pm 06$	Ne IV	$(^3P) 3p^4 D_{3/2}^0 - (^3P) 3s^4 P_{3/2}$	—
	0,247340	$0,247350 \pm 06$	Ne III?	—	—
	0,267790	$0,267798 \pm 06$	Ne III	$(^4S^0) 3p^3 P_{2,0} - (^4S^0) 3s^3 S_1^0$	—
	0,267864	$0,267868 \pm 06$	Ne III	$(^4S^0) 3p^3 P_1 - (^4S^0) 3s^3 S_1^0$	—
	0,277765	$0,277750 \pm 50$	Ne III	$(^2D^0) 3p^3 D_3 - (^2D^0) 3s^3 D_3^0$	—
	0,286688	$0,286688 \pm 06$	Ne	—	—
	0,331975	$0,331984 \pm 06$	Ne II	$(^1D) 3p^2 P_{1/2}^0 - (^1D) 3s^2 D_{3/2}$	—

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Измеренное значение, мкм	Ион	Уровни	Возбужде- ние
				верхний—нижний	
0 Неон (рис. 33.25)	*0,332377	0,332374 ± 05	Ne II	$(^3P) 3p \ ^2P_{3/2}^0 - (^3P) 3s \ ^2P_{3/2}$	непр.
	0,332437	0,332437 ± 10	Ne	—	—
	0,332717	0,332750 ± 50	Ne II	$(^3P) 3p \ ^4D_{5/2}^0 - (^3P) 3s \ ^4P_{3/2}$	—
	0,332923	0,332902 ± 10	Ne II	$(^3P) 3d \ ^4D_{7/2} - (^3P) 3p \ ^4D_{7/2}^0$	—
	0,333114	0,333107 ± 10	Ne III	$(^2P^0) 3p \ ^3D_2 - (^2P^0) 3s \ ^3P_1^0$	—
	*0,334552	0,334550 ± 05	Ne II	$(^1D) 3p \ ^2P_{3/2}^0 - (^1D) 3s \ ^2D_{5/2}$	непр.
	*0,337830	0,337826 ± 05	Ne II	$(^3P) 3p \ ^2P_{1/2}^0 - (^3P) 3s \ ^2P_{1/2}$	»
	*0,339286	0,339286 ± 06	Ne II	$(^3P) 3p \ ^2P_{3/2}^0 - (^3P) 3s \ ^2P_{1/2}$	»
	0,339320	0,339340 ± 10	Ne II	$(^3P) 3d \ ^2D_{3/2} - (^3P) 3p \ ^2D_{5/2}^0$	—
	*0,371309	0,371300 ± 100	Ne II	$(^3P) 3p \ ^2D_{5/2}^0 - (^3P) 3s \ ^2P_{3/2}$	непр.
Аргон (рис. 33.26 и рис. 33.27)	0,262493	0,262490 ± 06	Ar IV	$(^1D) 4p \ ^2D_{5/2}^0 - (^1D) 4s \ ^2D_{5/2}$	—
	0,275392	0,275391 ± 06	Ar III?	—	—
	0,288416	0,288424 ± 06	Ar III	$(^2D^0) 4p \ ^3P_2 - (^2D^0) 4s \ ^3D_3^0$	—
	*0,291300	0,291292 ± 06	Ar IV	$(^3P) 4p \ ^2D_{3/2}^0 - (^3P) 4s \ ^2P_{3/2}$	—
	*0,292627	0,292624 ± 06	Ar IV	$(^3P) 4p \ ^2D_{5/2}^0 - (^3P) 4s \ ^2P_{1/2}$	—
	0,300266	0,300264 ± 06	Ar	—	—
	0,302405	0,302400 ± 50	Ar III	$(^2P^0) 4p \ ^3D_3 - (^2P^0) 4s \ ^3P_2^0$	—
	0,305484	0,305480 ± 50	Ar III	$(^2P^0) 4p \ ^3D_2 - (^2P^0) 4s \ ^3P_1^0$	—
	*0,333613	0,333621 ± 06	Ar III	$(^2D^0) 4p \ ^3F_4 - (^2D^0) 4s \ ^3D_3^0$	непр.
	*0,334472	0,334479 ± 06	Ar III	$(^2D^0) 4p \ ^3F_3 - (^2D^0) 4s \ ^3D_2^0$	»
	*0,335849	0,335852 ± 06	Ar III	$(^2D^0) 4p \ ^3F_2 - (^2D^0) 4s \ ^3D_1^0$	»
	*0,351112	0,351113 ± 06	Ar III	$(^4S^0) 4p \ ^3P_2 - (^4S^0) 4s \ ^3S_1^0$	»
	0,351418	0,351415 ± 06	Ar III	$(^4S^0) 4p \ ^3P_1 - (^4S^0) 4s \ ^3S_1^0$	»
	0,357661	0,357690 ± 50	Ar II	$(^3P) 4d \ ^4F_{7/2} - (^3P) 4p \ ^4D_{5/2}^0$	—
	*0,363789	0,363786 ± 04	Ar III	$(^2D^0) 4p \ ^1F_3 - (^2D^0) 4s \ ^1D_2^0$	непр.
	0,37052	0,370520 ± 50	Ar	—	—
	0,379532	0,379528 ± 06	Ar III	$(^2P^0) 4p \ ^3D_3 - (^2P^0) 3d \ ^3P_2^0$	непр.
	0,385829	0,385826 ± 06	Ar III	$(^2P^0) 4p \ ^3D_2 - (^2P^0) 3d \ ^3P_1^0$	»
	0,40886	0,408860 ± 20	Ar	—	»
	0,414671	0,414660 ± 04	Ar III	$(^2D^0) 4p \ ^3P_2 - (^2P^0) 4s \ ^3P_2^0$	»
	*0,418298	0,418292 ± 06	Ar III?	—	»
	0,437075	0,437073 ± 06	Ar II	$(^1D) 4p \ ^2D_{3/2}^0 - (^3P) 3d \ ^2D_{3/2}$	»
	0,438375	0,438360 ± 60	Ar II	$(^3P) 4p \ ^4S_{3/2}^0 - (^3P) 4s \ ^2P_{3/2}$	—
	0,448181	0,448200 ± 100	Ar II	$(^1D) 4p \ ^2D_{5/2}^0 - (^3P) 3d \ ^2D_{5/2}$	—
	0,454505	0,454504 ± 10	Ar II	$(^3P) 4p \ ^2P_{3/2}^0 - (^3P) 4s \ ^2P_{3/2}$	—

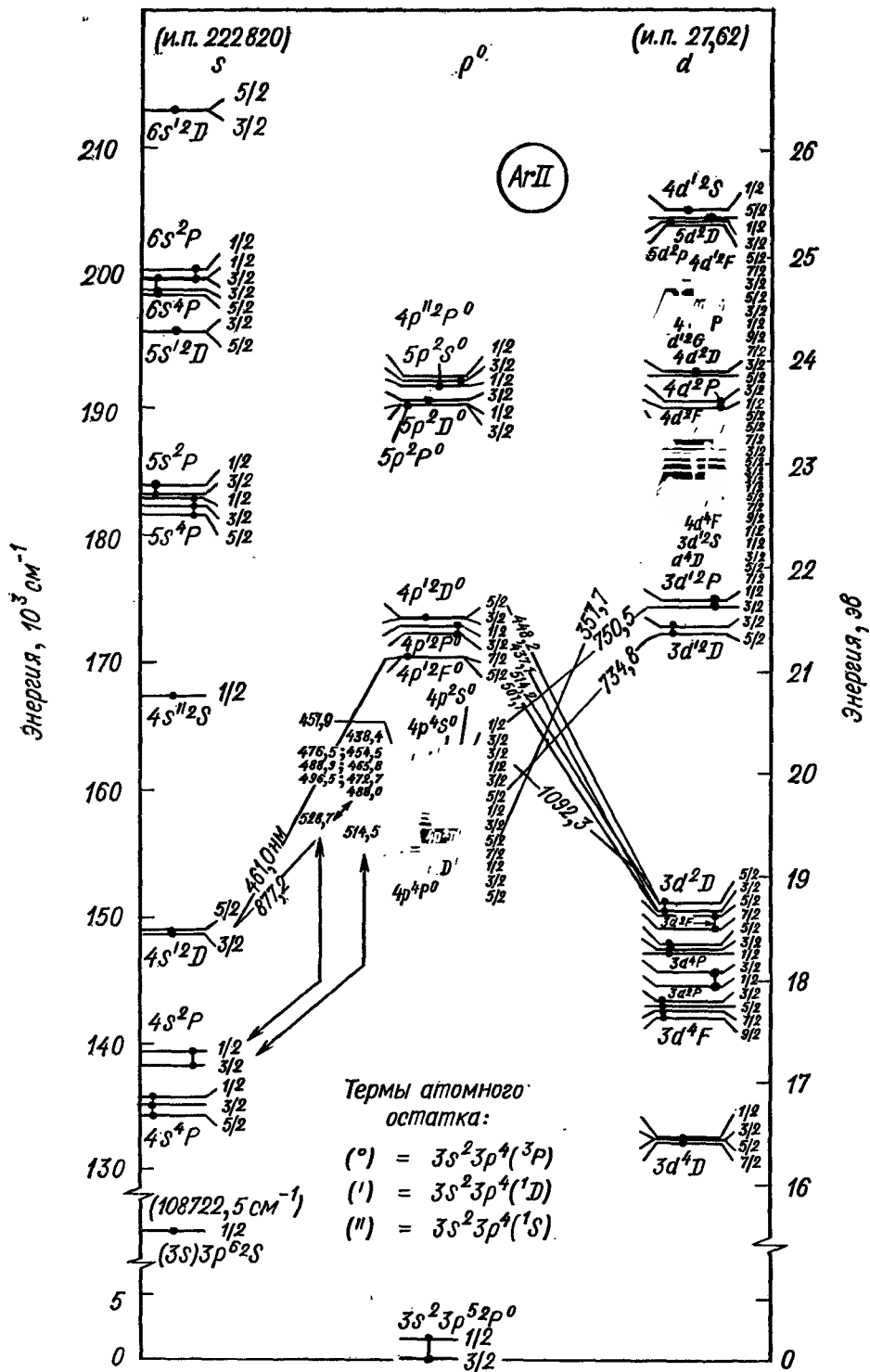


Рис. 33.26. Схема лазерных переходов в Ar II [3].

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Измеренное значение, мкм	Ион	Уровни	Возбужде- ние
				верхний—нижний	
0 Аргон (рис. 33.26 и рис. 33.27)	*0,457935	0,457936±16	Ar II	$(^3P) 4p\ ^2S^0_{1/2} - (^3P) 4s\ ^2P_{1/2}$	—
	0,460956	0,460957±10	Ar II	$(^1D) 4p\ ^2F^0_{7/2} - (^1D) 4s\ ^2D_{5/2}$	—
	0,465789	0,465795±02	Ar II	$(^3P) 4p\ ^2P^0_{1/2} - (^3P) 4s\ ^2P_{3/2}$	непр.
	0,472686	0,472689±04	Ar II	$(^3P) 4p\ ^2D^0_{3/2} - (^3P) 4s\ ^2P_{3/2}$	»
	*0,476486	0,476488±04	Ar II	$(^3P) 4p\ ^2P^0_{3/2} - (^3P) 4s\ ^2P_{1/2}$	»
	*0,487986	0,487986±04	Ar II	$(^3P) 4p\ ^2D^0_{1/2} - (^3P) 4s\ ^2P_{3/2}$	»
	0,488903	0,488906±06	Ar II	$(^3P) 4p\ ^2P^0_{1/2} - (^3P) 4s\ ^2P_{1/2}$	»
	*0,496507	0,496509±02	Ar II	$(^3P) 4p\ ^2D^0_{3/2} - (^3P) 4s\ ^2P_{1/2}$	»
	0,49928	0,499255±05	Ar	—	—
	*0,501716	0,501717±02	Ar II	$(^1D) 4p\ ^2F^0_{5/2} - (^3P) 3d\ ^2D_{3/2}$	непр.
	0,514179	0,514180±05	Ar II	$(^1D) 4p\ ^2F^0_{7/2} - (^3P) 3d\ ^2D_{5/2}$	»
	*0,514532	0,514533±02	Ar II	$(^3P) 4p\ ^4D^0_{5/2} - (^3P) 4s\ ^2P_{3/2}$	»
	*0,528690	0,528700±100	Ar II	$(^3P) 4p\ ^4D^0_{3/2} - (^3P) 4s\ ^2P_{1/2}$	»
	0,550220	0,550220±50	Ar III	$(^2D^0) 4p\ ^3D_3 - (^2P^0) 4s\ ^3P^0_2$	—
	0,673000	0,673000±50	Ar	—	—
	0,734805	0,734804±05	Ar II	$(^1D) 3d\ ^2D_{5/2} - (^3P) 4p\ ^2D^0_{5/2}$	—
	0,750514	0,750508±05	Ar II	$(^1D) 3d\ ^2P_{3/2} - (^3P) 4p\ ^2S^0_{1/2}$	—
	0,877186	0,878000±300	Ar II	$[(^3P) 4p\ ^2P^0_{3/2} - (^1D) 4s\ ^2D_{5/2}]$	—
	*1,092344	1,092300±100	Ar II	$(^3P) 4p\ ^2P^0_{3/2} - (^3P) 3d\ ^2D_{5/2}$	непр.
Криптон (рис.33.28 и рис. 33.29)	0,264927	0,264941±06	Kr II?	? $[(^3P) 5f\ ^2D^0_{3/2} - (^3P) 4d\ ^4P_{3/2}]$	—
	0,266441	0,266450±06	Kr II?	? $[(^1D) 5d\ ^2P_{3/2} - (^3P) 5p\ ^4D^0_{1/2}]$	—
	0,274139	0,274151±06	Kr	—	—
	0,304970	0,304974±06	Kr	—	—
	0,312438	0,312443±06	Kr III	$(^2D^0) 5p\ ^1D_2 - (^2D^0) 5s\ ^1D^0_2$	—
	0,323951	0,323943±06	Kr III	$(^2P^0) 5p\ ^1D_2 - (^2P^0) 5s\ ^1P^0_1$	—
	0,337496	0,337500±50	Kr III	$(^2P^0) 5p\ ^3D_3 - (^2P^0) 5s\ ^3P^0_2$	непр.
	*0,350742	0,350742±06	Kr III	$(^4S^0) 5p\ ^3P_2 - (^4S^0) 5s\ ^3S^0_1$	»
	*0,356423	0,356420±06	Kr III	$(^4S^0) 5p\ ^3P_1 - (^4S^0) 5s\ ^3S^0_1$	»
	0,377134	0,377134±05	Kr II	$(^3P) 5d\ ^4P_{1/2} - (^3P) 5p\ ^4P^0_{3/2}$	—
	*0,406737	0,406736±06	Kr III	$(^2D^0) 5p\ ^1F_3 - (^2D^0) 5s\ ^1D^0_2$	непр.
	*0,413133	0,413138±06	Kr III	$(^4S^0) 5p\ ^5P_2 - (^4S^0) 5s\ ^3S^0_1$	»
	0,415444	0,415445±04	Kr III	$(^2D^0) 5p\ ^3F_3 - (^2D^0) 5s\ ^1D^0_2$	»
	0,417179	0,417181±10	Kr III	$(^4S^0) 5p\ ^5P_1 - (^4S^0) 5s\ ^3S^0_1$	—
	0,422658	0,422651±06	Kr III	$(^2D^0) 5p\ ^3F_2 - (^2D^0) 4d\ ^3D^0_1$	—
	0,431781	0,431800±100	Kr II	$(^3P) 6s\ ^4P_{3/2} - (^3P) 5p\ ^4P^0_{3/2}$	послесв.
	0,438654	0,438700±100	Kr II	$(^3P) 6s\ ^4P_{5/2} - (^3P) 5p\ ^4P^0_{3/2}$	—
	0,444329	0,444328±04	Kr III	$(^2D^0) 5p\ ^3D_2 - (^2D^0) 4d\ ^3D^0_1$	—
	0,457720	0,457720±10	Kr II	$(^1D) 5p\ ^2F^0_{7/2} - (^1D) 5s\ ^2D_{5/2}$	непр.
	0,458285	0,458300±100	Kr II	$(^3P) 6s\ ^4P_{3/2} - (^3P) 5p\ ^4D^0_{5/2}$	послесв.
	0,461528	0,461520±10	Kr II	$(^3P) 5p\ ^2P^0_{3/2} - (^3P) 5s\ ^2P_{3/2}$	—
	*0,461915	0,461917±10	Kr II	$(^3P) 5p\ ^2D^0_{3/2} - (^3P) 5s\ ^2P_{3/2}$	непр.

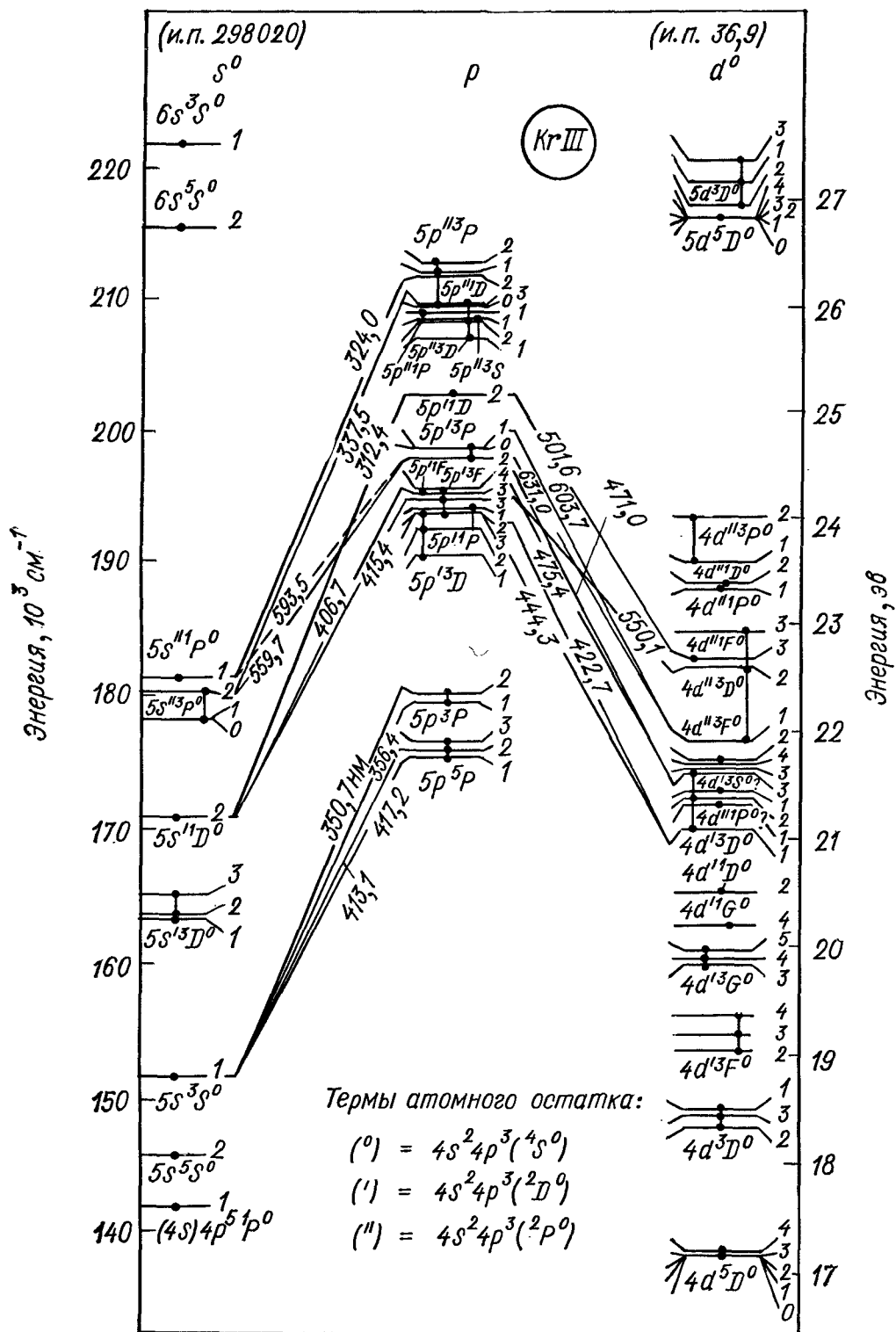


Рис. 33.29. Схема лазерных переходов в Kr III [3].

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Измеренное значение, мкм	Ион	Уровни	Возбужде- ние
				верхний—нижний	
0 Криптон (рис. 33.28 и рис. 33.29)	0,463386	0,463392±06	Kr II	$(1D) 5p^2 F_{5/2}^0 - (1D) 5s^2 D_{3/2}$	непр.
	0,465016	0,465016±10	Kr II	$(^3P) 5p^2 P_{1/2}^0 - (^3P) 5s^4 P_{1/2}$	—
	0,468041	0,468045±06	Kr II	$(^3P) 5p^2 S_{1/2}^0 - (^3P) 5s^2 P_{1/2}$	непр.
	0,469444	0,469500±100	Kr II	$(^3P) 6s^4 P_{5/2} - (^3P) 5p^4 D_{5/2}^0$	послесв.
	0,471048	0,471030±60	Kr III	$(^2D^0) 5p^3 F_4 - (^2D^0) 4d^3 D_3^0$	—
	0,475448	0,475450±30	Kr III	$(^2D^0) 5p^1 F_3 - (^2D^0) 4d^3 D_3^0$	—
	*0,476243	0,476244±06	Kr II	$(^3P) 5p^2 D_{3/2}^0 - (^3P) 5s^2 P_{1/2}$	непр.
	0,476573	0,476571±10	Kr II	$(^3P) 5p^4 D_{5/2}^0 - (^3P) 5s^4 P_{3/2}$	»
	0,479633	0,479630±60	Kr II	$(^3P) 6s^2 P_{1/2} - (^3P) 5p^4 S_{3/2}^0$	—
	0,482517	0,482518±06	Kr II	$(^3P) 5p^4 S_{3/2}^0 - (^3P) 5s^2 P_{1/2}$	непр.
	*0,484659	0,484666±06	Kr II	$(^3P) 5p^2 P_{1/2}^0 - (^3P) 5s^2 P_{3/2}$	»
	0,501645	0,501640±10	Kr III	$(^2D^0) 5p^1 D_2 - (^2P^0) 4d^1 F_3^0$	»
	0,502240	0,502200±100	Kr II	$(^3P) 5p^4 D_{3/2}^0 - (^3P) 5s^2 P_{3/2}$	»
	0,503747	0,503750±60	Kr II	—	—
	0,512571	0,512600±100	Kr II	$(^3P) 6s^4 P_{3/2} - (^3P) 5p^4 D_{5/2}^0$	послесв.
	*0,520831	0,520832±04	Kr II	$(^3P) 5p^4 P_{3/2}^0 - (^3P) 5s^4 P_{3/2}$	непр.
	0,521792	0,521820±40	Kr II	$(^3P) 5p^4 D_{1/2}^0 - (^3P) 5s^2 P_{1/2}$	—
	*0,530865	0,530868±04	Kr II	$(^3P) 5p^4 P_{1/2}^0 - (^3P) 5s^4 P_{3/2}$	непр.
	0,550143	0,550150±50	Kr III	$(^2D^0) 5p^3 F_3 - (^2P^0) 4d^3 D_2^0$	—
	0,559732	0,559770±100	Kr III	$(^2D^0) 5p^3 P_2 - (^2P^0) 5s^3 P_2^0$	—
	*0,568188	0,568192±04	Kr II	$(^3P) 5p^4 D_{5/2}^0 - (^3P) 5s^2 P_{3/2}$	непр.
	0,575298	0,575340±50	Kr II	$(^3P) 5p^4 D_{3/2}^0 - (^3P) 5s^2 P_{1/2}$	»
			Kr III	$(^2D^0) 5p^3 P_2 - (^2P^0) 5s^1 P_1^0$	—
	0,593503	0,593530±60		или	
			Kr II	$(^3P) 5d^4 F_{3/2} - (1D) 5p^2 P_{3/2}^0$	
	0,603716	0,603760±80	Kr III	$(^2D^0) 5p^3 P_1 - (^2P^0) 4d^3 D_1^0$	—
	0,6072	0,607200±100	Kr	—	—
	0,616880	0,616880±50	Kr II	$(1D) 5p^2 F_{5/2}^0 - (^3P) 4d^2 D_{3/2}$	непр.
	0,631022	0,631030±80	Kr III	$(^2D^0) 5p^3 P_2 - (^2P^0) 4d^3 D_1^0$	—
	0,631276	0,631260±80	Kr	—	непр.
	0,641661	0,641700±100	Kr II	$(1D) 5p^2 P_{3/2}^0 - (^3P) 4d^2 P_{3/2}$	—
	*0,647088	0,647100±50	Kr II	$(^3P) 5p^4 P_{5/2}^0 - (^3P) 5s^2 P_{3/2}$	непр.
	0,657012	0,657000±50	Kr II	$(1D) 5p^2 D_{5/2}^0 - (^3P) 4d^2 F_{5/2}$	»
	0,660293	0,660280±80	Kr III	$(^2D^0) 5p^3 P_2 - (^2P^0) 4d^1 F_3^0$	»
	*0,676442	0,676457±10	Kr II	$(^3P) 5p^4 P_{1/2}^0 - (^3P) 5s^2 P_{1/2}$	»
	0,687084	0,687096±10	Kr II	$(1D) 5p^2 F_{5/2}^0 - (^3P) 4d^2 P_{3/2}$	»
	0,743572	0,743560	Kr II	$(1D) 4d^2 D_{3/2} - (^3P) 5p^4 D_{5/2}^0$	—
	0,752546	0,752550±10	Kr II	$(^3P) 5p^4 P_{3/2}^0 - (^3P) 5s^2 P_{1/2}$	непр.
	0,793145	0,793140	Kr II	$(1D) 5p^2 F_{7/2}^0 - (^3P) 4d^2 F_{5/2}$	»
	*0,799322	0,799300±50	Kr II	$(^3P) 5p^4 P_{3/2}^0 - (^3P) 4d^4 D_{1/2}$	»
	0,828037	0,828030±10	Kr II	$(1D) 5p^2 F_{5/2}^0 - (^3P) 4d^2 F_{5/2}$	»
	0,847331	0,847300	Kr II	$(1D) 4d^2 D_{3/2} - (^3P) 5p^4 D_{5/2}^0$	—

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Измеренное значение, мкм	Ион	Уровни	Возбужде- ние
				верхний—нижний	
0					
Криптон (рис. 33.28 и рис. 33.29)	0,858778	$0,858900 \pm 300$	Kr III ²	—	—
	0,869011	0,869010	Kr II	$(^3P) 5p \ ^2P_{1/2}^0 - (^1D) 5s \ ^2D_{3/2}$	непр.
	0,897859	0,897840	Kr II	$(^1D) 4d \ ^2D_{5/2} - (^3P) 5p \ ^4D_{3/2}^0$	—
	1,065950	1,065960	Kr II	$(^1D) 4d \ ^2D_{5/2} - (^3P) 5p \ ^2P_{3/2}^0$	—
	1,329380	1,329500	Kr II	$(^1D) 4d \ ^2D_{5/2} - (^3P) 5p \ ^2D_{3/2}^0$	—
Ксенон (рис. 33.30 и рис. 33.31)	0,247739	$0,247739 \pm 03$	Xe	—	—
	0,269184	$0,269184 \pm 03$	Xe	—	—
	0,298385	$0,298370 \pm 50$	Xe III	$(^2P^o) 6p \ 32_1 - (^2P^o) 6s \ ^3P_0^0$	—
	0,307976	$0,307976 \pm 03$	Xe	—	—
	0,324684	$0,324694 \pm 06$	Xe III	$(^2P^o) 6p \ ^3D_3 - (^2D^o) 5d \ ^3D_3^0$	—
	0,330604	$0,330592 \pm 06$	Xe IV ²	—	—
	*0,333090	$0,333090 \pm 03$	Xe IV	—	непр.
	0,334980	$0,334980 \pm 03$	Xe	—	—
	*0,345424	$0,345423 \pm 06$	Xe III	$(^2D^o) 6p \ ^1D_2 - (^2D^o) 6s \ ^1D_2^0$	непр.
	0,348331	$0,348331 \pm 03$	Xe	—	—
	0,354233	$0,354231 \pm 05$	Xe III	$(^2D^o) 6p \ ^3P_2 - (^2D^o) 6s \ ^3D_3^0$	—
	0,359660	$0,359600 \pm 100$	Xe III	—	непр.
	0,364551	$0,364551 \pm 03$	Xe	—	—
	0,366920	$0,366920 \pm 03$	Xe	—	непр.
	0,374571	$0,374573 \pm 06$	Xe III	$(^2D^o) 6p \ ^1D_2 - (^2D^o) 5d \ ^1D_2^0$	»
	0,375994	$0,375994 \pm 03$	Xe	—	—
	*0,378097	$0,378099 \pm 06$	Xe III	$(^4S^o) 6p \ ^3P_2 - (^4S^o) 6s \ ^3S_1^0$	непр.
	0,380329	$0,380329 \pm 03$	Xe	—	—
			Xe III	$(^2D^o) 6p \ ^3F_2 - (^2D^o) 6s \ ^3D_2^0$	
	0,3841	$0,384100 \pm 100$	или		непр.
			Xe III	$(^2D^o) 6p \ ^3P_1 - (^2D^o) 5d \ ^3D_2^0$	
	0,397301	$0,397301 \pm 03$	Xe	—	—
			Xe III	$(^2D^o) 6p \ ^3P_1 - (^2D^o) 6s \ ^1D_2^0$	
	0,3993	$0,399300 \pm 100$	или		непр.
			Xe III	$[(^4S^o) 6p \ ^5P_2 - (^4S^o) 5d \ ^3D_1^0]$	
	0,405005	$0,404990 \pm 20$	Xe III	$(^4S^o) 6p \ ^3P_1 - (^4S^o) 6s \ ^3S_1^0$	—
	*0,406041	$0,406048 \pm 06$	Xe III	$(^2P^o) 6p \ 32_1 - (^2P^o) 5d \ 25_1^0$	непр.
	0,414572	$0,414530 \pm 60$	Xe III	$(^2D^o) 6p \ ^3D_2 - (^2D^o) 5d \ ^3D_1^0$	»
	*0,421401	$0,421405 \pm 06$	Xe III	$(^2D^o) 6p \ ^3P_2 - (^2D^o) 5d \ ^3D_3^0$	»
	*0,424024	$0,424026 \pm 10$	Xe III	$(^2D^o) 6p \ ^1D_2 - (^2P^o) 5d \ 17_3^0$	»
	*0,427259	$0,427260 \pm 06$	Xe III	$(^2D^o) 6p \ ^3F_4 - (^2D^o) 5d \ ^3D_3^0$	»
	0,428588	$0,428592 \pm 06$	Xe III	$(^2D^o) 6p \ ^3D_3 - (^2D^o) 6s \ ^1D_2^0$	—
	0,429639	$0,429633 \pm 05$	Xe II	$(^3P) 7s \ ^3P_{1/2} - (^3P) 6p \ ^4P_{3/2}^0$	—
	0,430575	$0,430575 \pm 03$	Xe IV	$(^2D^o) 6p \ ^3D_3 - (^2D^o) 5d \ ^3D_3^0$	—
	0,441308	$0,441300 \pm 60$	Xe	—	—
	0,443415	$0,443422 \pm 10$	Xe III	$(^2D^o) 6p \ ^3F_2 - (^2D^o) 5d \ ^3D_1^0$	непр.
	0,450345	$0,450350 \pm 60$	Xe III	$(^2P^o) 6p \ 32_1 - (^2P^o) 5d \ 27_2^0$	—

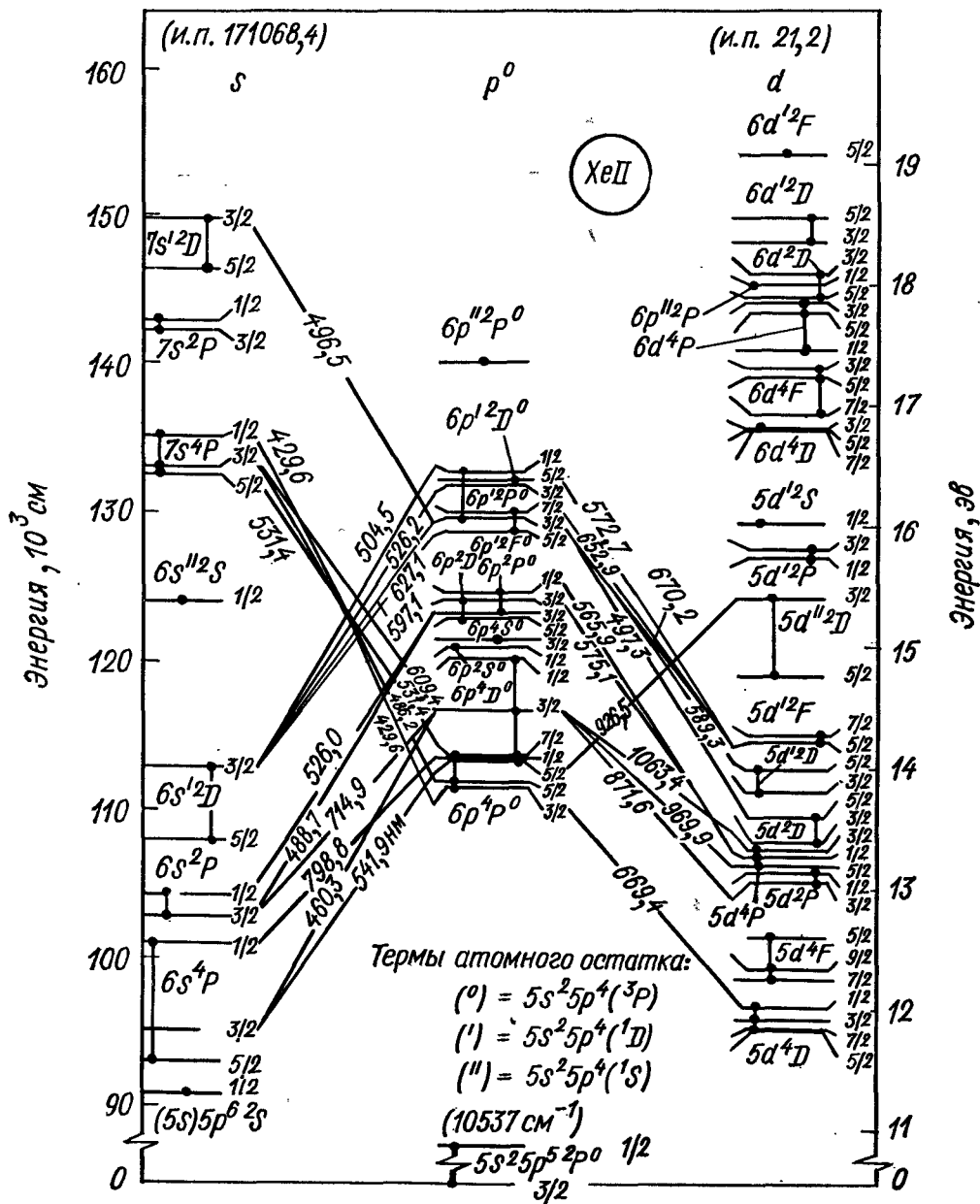


Рис. 33.30. Схема лазерных переходов в Xe II [3].

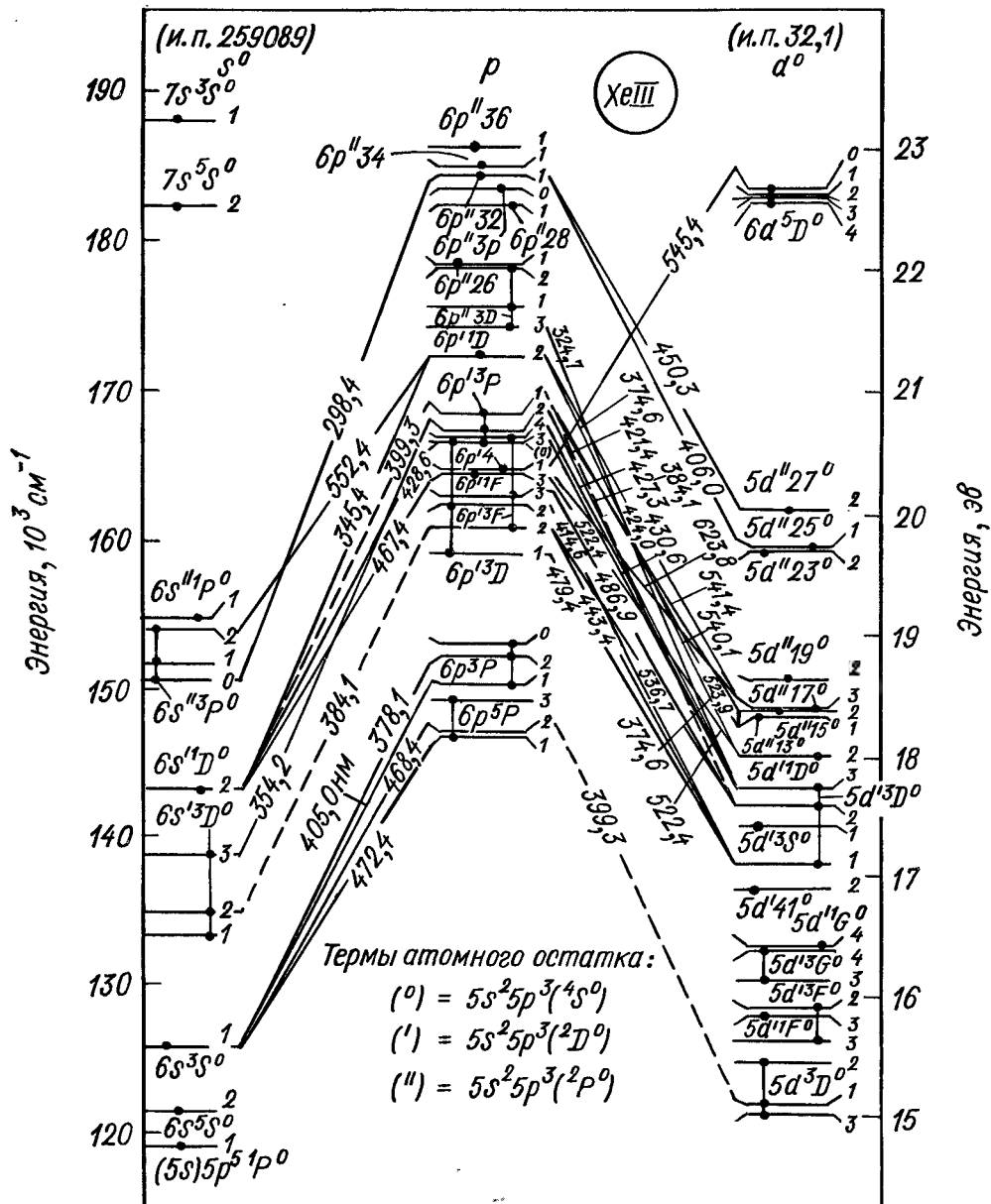


Рис. 33.31. Схема лазерных переходов в Xe III [3].

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Измеренное значение, мкм	Ион	Уровни	Возбужде- ние
				верхний—нижний	
0 Ксенон (рис. 33-30 и рис. 33.31)	0,455874	0,455874±06	Xe IV	—	—
	*0,460303	0,460302±04	Xe II	$(^3P) 6p\ ^4D_{3/2}^0 - (^3P) 6s\ ^4P_{3/2}$	непр.
	0,467368	0,467373±06	Xe III	$(^2D^0) 6p\ ^1F_3 - (^2D^0) 6s\ ^1D_2^0$	»
	0,468354	0,468357±06	Xe III	$(^4S^0) 6p\ ^5P_2 - (^4S^0) 6s\ ^3S_1^0$	»
	0,472357	0,472310±60	Xe III	$(^4S^0) 6p\ ^5P_1 - (^4S^0) 6s\ ^3S_1^0$	—
	0,474894	0,474894±03	Xe III?	—	непр.
	0,479448	0,479450±60	Xe III	$(^2D^0) 6p\ ^3D_1 - (^2D^0) 5d\ ^3D_1^0$	—
	0,486249	0,486200±100	Xe II	$(^3P) 7s\ ^4P_{3/2} - (^3P) 6p\ ^4P_{3/2}^0$	непр.
	0,486946	0,486948±06	Xe III	$(^2D^0) 6p\ ^3F_3 - (^2D^0) 5d\ ^3D_2^0$	»
	0,488730	0,488700±100	Xe II	$[(^3P) 6p\ ^2P_{3/2}^0 - (^2P) 6s\ ^2P_{3/2}]$	»
	*0,495418	0,495418±03	Xe IV	—	»
	0,496508	0,496500±06	Xe II	$(^1D) 7s\ ^2D_{3/2} - (^1D) 6p\ ^2P_{3/2}^0$	»
	0,497270	0,497271±05	Xe II	$(^1D) 6p\ ^2P_{3/2}^0 - (^3P) 5d\ ^2D_{5/2}$	—
	*0,500780	0,500780±03	Xe IV	—	непр.
	0,504492	0,504489±06	Xe II	$(^1D) 6p\ ^2P_{1/2}^0 - (^1D) 6s\ ^2D_{3/2}$	»
	0,515704	0,515704±06	Xe IV V?	—	—
	*0,515908	0,515908±03	Xe IV	—	непр.
	0,522364	0,522340±60	Xe III	$(^2D^0) 6p\ ^1F_3 - (^2D^0) 5d\ ^1D_2^0$	—
	*0,523893	0,523889±06	Xe III	$(^2D^0) 6p\ ^3P_2 - (^2P^0) 5d\ 13_1^0$	непр.
	0,525630	0,525650±60	Xe	—	—
	*0,526017	0,526017±03	Xe IV	—	непр.
	0,526043	0,526043±03	Xe II	$(^3P) 6p\ ^2P_{3/2}^0 - (^3P) 6s\ ^2P_{1/2}$	»
	*0,526195	0,526150±100	Xe II	$(^1D) 6p\ ^2D_{3/2}^0 - (^1D) 6s\ ^2D_{3/2}$	»
	0,531389	0,531400±100	Xe II	$(^3P) 7s\ ^4P_{3/2} - (^3P) 6p\ ^4D_{7/2}^0$	послев.
	0,534334	0,534334±05	Xe IV, V?	—	—
	*0,535290	0,535290±03	Xe IV	—	непр.
	0,536706	0,536700±60	Xe III	$(^2D^0) 6p\ ^3F_2 - (^2D^0) 5d\ ^3D_2^0$	—
	*0,539460	0,539460±03	Xe IV	—	непр.
	0,540100	0,540090±30	Xe III	$(^2D^0) 6p\ ^3P_2 - (^2P^0) 5d\ 15_2^0$	—
	0,541353	0,541350±60	Xe III	$(^2D^0) 6p\ ^3P_2 - (^2P^0) 5d\ 17_3^0$	—
	*0,541915	0,541916±06	Xe II	$(^3P) 6p\ ^4D_{3/2}^0 - (^3P) 6s\ ^4P_{3/2}$	непр.
	0,545433	0,545460±60	Xe III	$(^4S^0) 6d\ ^5D_0^0 - (^2D^0) 6p\ 4_1$	—
	0,549931	0,549931±04	Xe IV, V?	—	—
	0,552437	0,552450±50	Xe III	$(^2D^0) 6p\ ^1D_2 - (^2P^0) 6s\ ^3P_2^0$	непр.
	0,559235	0,559235±05	Xe IV, V?	—	—
	0,565937	0,565900±100	Xe II	$(^3P) 6p\ ^2P_{1/2}^0 - (^3P) 5d\ ^4P_{1/2}$	непр.
	0,572690	0,572700±100	Xe II	$[(^1D) 6p\ ^2D_{5/2}^0 - (^1D) 5d\ ^2F_{5/2}]$	»
	0,575102	0,575100±100	Xe II	$(^3P) 6p\ ^2D_{3/2}^0 - (^3P) 5d\ ^4P_{1/2}$	»
	0,589328	0,589330±03	Xe II	$(^1D) 6p\ ^2P_{3/2}^0 - (^1D) 5d\ ^2D_{5/2}$	—
	*0,595567	0,595567±03	Xe IV	—	—
	*0,597111	0,597112±06	Xe II	$(^1D) 6p\ ^2P_{3/2}^0 - (^1D) 6s\ ^2D_{3/2}$	непр.
	0,609361	0,609400±100	Xe II	$(^3P) 7s\ ^4P_{3/2} - (^3P) 6p\ ^4D_{3/2}^0$	послев.
	0,617619	0,617619±03	Xe	—	непр.

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Измеренное значение, мкм	Ион	Уровни	Возбужде- ние
				верхний—нижний	
0 Ксенон (рис. 33.30 и рис. 33.31)	0,623825	0,623890 ± 80	Xe III	$(^2D^0) 6p\ ^1F_3 - (^2P^0) 5d\ 17_3^0$	непр.
	*0,627081	0,627090 ± 10	Xe II	$(^1D) 6p\ ^2F_{5/2}^0 - (^1D) 6s\ ^2D_{3/2}$	»
	0,628641	0,628660 ± 60	Xe IV, V?	—	—
	0,634318	0,634318 ± 30	Xe IV, V?	—	—
	0,652865	0,652850 ± 50	Xe II	$(^1D) 6p\ ^2F_{7/2}^0 - (^1D) 5d\ ^2F_{5/2}$	непр.
	0,669431	0,66943	Xe II	$(^3P) 6p\ ^4P_{3/2}^0 - (^3P) 5d\ ^4D_{1/2}$	»
	0,669950	0,669950 ± 30	Xe IV, V?	—	—
	0,670225	0,670200 ± 100	Xe II	$(^1D) 6p\ ^2P_{3/2}^0 - (^1D) 5d\ ^2F_{5/2}$	непр.
	0,707234	0,70723	Xe II	$37_{5/2}^0 - (^3P) 6d\ ^4D_{5/2}$	—
	0,714903	0,714894 ± 60	Xe II	$(^3P) 6p\ ^4D_{3/2}^0 - (^3P) 6s\ ^2P_{3/2}$	непр.
	*0,782763	0,782800 ± 300	Xe II	? $35_{5/2}^0 - 16_{3/2}$	—
	*0,798800	0,798900 ± 300	Xe II	$(^3P) 6p\ ^4P_{1/2}^0 - (^3P) 6s\ ^4P_{1/2}$	—
	0,833271	0,833000 ± 300	Xe II	? $27_{5/2}^0 - (^3P) 6d\ ^4D_{5/2}$	—
	0,844619	0,844300 ± 300	Xe II	? $27_{5/2}^0 - (^3P) 6d\ ^4D_{3/2}$	—
	0,856688	0,856688 ± 03	Xe	—	—
	0,858251	0,858200 ± 300	Xe II	? $31_{5/2}^0 - 10_{5/2}$	—
	*0,871617	0,871400 ± 300	Xe II	$(^3P) 6p\ ^4D_{3/2}^0 - (^3P) 5d\ ^2P_{3/2}$	—
	*0,905930	0,906300 ± 400	Xe II	? $27_{5/2}^0 - 16_{3/2}$	—
	0,926539	0,926500 ± 400	Xe II	? $(^1S) 5d\ ^2D_{3/2} - (^3P) 6p\ ^4D_{5/2}^0$	—
	0,928854	0,928700 ± 400	Xe II	? $13_{1/2}^0 - (^1D) 5d\ ^2S_{1/2}$	—
	*0,969859	0,969700 ± 200	Xe II	$(^3P) 6p\ ^4D_{3/2}^0 - (^3P) 5d\ ^4P_{5/2}$	—
	1,063385	1,063400 ± 600	Xe II	$(^3P) 6p\ ^4D_{3/2}^0 - (^3P) 5d\ ^4P_{3/2}$	—
	*1,0950	1 095000 ± 600	Xe	—	—

33.3. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

В молекулярных газах в общем случае лазерные переходы осуществляются между различными электронно-колебательно-вращательными уровнями молекул. Это позволяет получить генерацию на значительно большем числе линий, чем в случаях нейтральных и ионизованных атомных газов.

Для накачки молекулярных газовых лазеров используются самые различные методы: электрический разряд, оптическая, химическая и другие виды накачки. За-

частую возбужденная лазерная молекула сама создается в процессе, сопровождающем тот или иной вид накачки. Основные материалы, служащие в качестве исходных для создания лазерного эффекта в различных молекулярных системах, перечислены в табл. 33.3. Список соответствующих лазерных переходов для двухатомных, трехатомных и многоатомных молекул приведен в табл. 33.4—33.6.

Для обозначения уровней молекул используется стандартная система обозначений молекулярной спектроскопии. В таблицах предполагается, если специально не оговорено, $E_{эд} = 0$.

Вещества молекулярных газовых лазеров [5]

Вещество	Таблица (раздел)	Лазерный переход в молекуле	Вещество	Таблица (раздел)	Лазерный переход в молекуле
BBr ₃	33.4(3б)	HBr	D ₂	33.4(6)	D ₂ , HD
BCl ₃	33.4(4б)	HCl		33.4(3в)	DBr
BF ₃	33.4(5б)	HF		33.4(4в)	DCI
BrCN	33.5(3б)	DCN		33.4(5в)	DF
Br ₂	33.4(3а)	HBr		33.5(3в)	DCN
CBrF ₃	33.4(5а,б)	HF	D ₂ O	33.5(4в)	D ₂ O
	33.4(5в)	DF	F ₂	33.4(5а)	HF
CClF ₃	33.4(4б)	HCl	H ₂ CO	33.5(3а)	HCN
	33.4(5а,б)	HF		33.5(3в)	HC ¹⁵ N
	33.4(5в)	DF	HI	33.4(4а)	HCl
CCl ₂ F ₂	33.4(5а,б)	HF	H ₂	33.4(3)	HBr
	33.4(5в)	DF		33.4(4а,б)	HCl
CCl ₃ F	33.4(5б)	HF		33.4(5а,б)	HF
CD ₄	33.5(3б)	DCN		33.4(6а—в)	H ₂
CF ₄	33.4(5а)	HF	H ₂ C=CHCl	33.6(4)	H ₂ C=CHCl
	33.4(5в)	DF	H ₂ O	33.4(3б)	HBr
CH ₃ Br	33.4(4в)	HCl		33.4(4б)	HCl
CH ₃ CN	33.4(3а)	HCN		33.4(5б)	HF
CH ₃ Cl	33.4(4в)	HCl		33.5(4а)	H ₂ O
	33.4(5а)	HF		33.5(4б)	H ₂ ¹⁸ O
CH ₃ F	33.6(1)	CH ₃ F	H ₂ S	33.5(5)	H ₂ S
CH ₄	33.4(5а)	HF	ICN	33.5(3а)	HCN
	33.4(3а)	HCN	ND ₃	33.5(3б)	DCN
(CH ₃) ₂ NH	33.5(3а)	HCN	NH ₃	33.6(3)	NH ₃
CH ₃ OH	33.6(2)	CH ₃ OH		33.5(3а)	HCN
CN	33.4(1)	CN	NOCl	33.4(7)	NO
C ₂ N ₂	33.4(1)	CN	N ₂	33.4(8а—д)	N ₂
CO	33.4(2а,б)	CO		33.4(5а)	HF
CO ₂	33.5(1а—3)	CO ₂	N ₂ O	33.5(6а,б)	N ₂ O
CS ₂	33.4(2а)	CO	O ₂	33.4(2а)	CO
	33.5(2)	CS ₂	SO ₂	33.5(8)	SO ₂
Cl ₂	33.4(4а)	HCl	SF ₆	33.4(5а)	HF
	33.4(4б)	HCl	UF ₆	33.4(5а)	HF
	33.4(4в)	DCI		33.4(5в)	DF

Таблица 33.4

Лазерные переходы в двухатомных молекулярных газах [5]

$\lambda_{\text{вак}}, \text{мкм}$	$\nu, \text{см}^{-1}$	Переход	Относительная интенсивность
------------------------------------	-----------------------	---------	-----------------------------

(1) CN-лазер, переходы в X²Σ

Полоса 4—3

5,1838	1929,08	P (9)	0,54
5,1946	1925,09	P (10)	0,42
5,2055	1921,05	P (11)	0,04

(2а) CO-лазер (рис. 33.32). переходы между B¹ Σ — A¹ Π

Полоса 0—3

0,55921	17 882,2	Q (11)	0,3
0,55949	17 873,3	Q (10)	0,5
0,55975	17 864,9	Q (9)	1,0
0,55998	17 857,6	Q (8) или R (13)	1,0
0,56019	17 850,9	Q (7)	1,0
0,56040	17 844,3	Q (6)	0,3
0,56053	17 840,1	Q (5)	0,02

$\lambda_{\text{вак}}, \text{мкм}$	$\nu, \text{см}^{-1}$	Переход	Относительная интенсивность
<i>Полоса 0—4</i>			
0,60646	16 489,2	Q (9)	0,5
0,60674	16 481,6	Q (8)	0,8
0,60699	16 474,8	Q (7)	1,0
0,60722	16 448,6	Q (6)	0,6
0,60742	16 463,1	Q (5)	0,3
0,60759	16 458,6	Q (4)	0,03
<i>Полоса 0—5</i>			
0,65973	15 157,7	Q (10)	0,06
0,66013	15 148,5	Q (9)	0,3
0,66049	15 140,2	Q (8) или P ₁ (13)	0,7
0,66082	15 132,7	Q (7)	1,0
0,66109	15 126,5	Q (6)	0,4
0,66133	15 121,0	Q (5)	0,2
0,66153	15 116,4	Q (4)	0,02

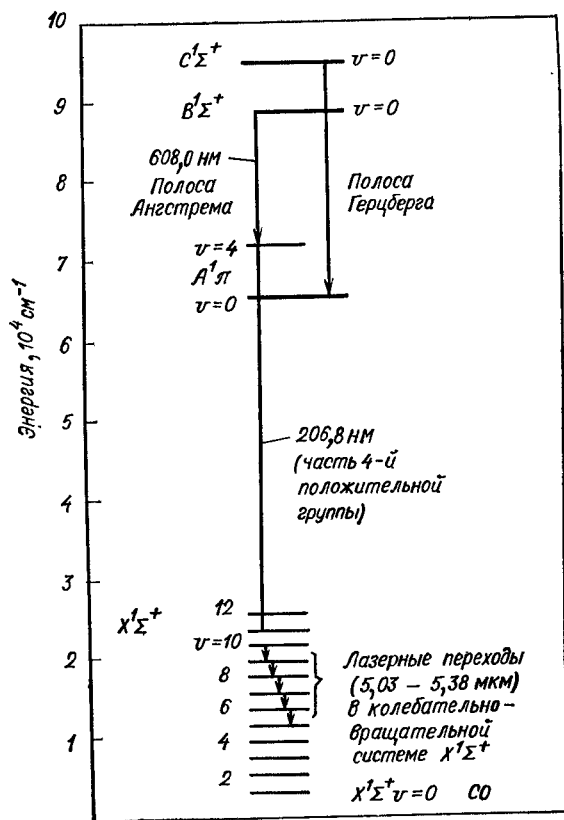


Рис. 33.32. Схема части лазерных переходов на молекулах CO, показывающая электронные переходы в полосе Ангстрема и колебательно-вращательные переходы в основном состоянии молекулы CO $X^1\Sigma^+$ [5].

$\lambda_{\text{вак}}, \text{мкм}$	$\nu, \text{см}^{-1}$	Переход
<i>(26) CO-лазер. переходы в электронном состоянии $X^1\Sigma^+$</i>		
<i>Полоса 5—4</i>		
5,08691	1965,83	P (18)
5,09806	1961,53	P (19)
5,10937	1957,19	P (20)
5,12079	1952,82	P (21)
5,13237	1948,42	P (22)
5,14405	1943,99	P (23)
5,15597	1939,50	P (24)
5,16794	1935,01	P (25)
5,18009	1930,47	P (26)
5,19236	1925,91	P (27)
<i>Полоса 6—5</i>		
5,03755	1985,09	P (7)
5,04750	1981,18	P (8)
5,05755	1977,24	P (9)
5,06773	1973,27	P (10)
5,07807	1969,25	P (11)
5,08845	1965,23	P (12)
5,09905	1961,15	P (13)
5,10985	1957,00	P (14)
5,12030	1953,01	P (15)
5,13157	1948,72	P (16)

$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход	$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход
5,14268	1944,51	P (17)	Полоса 9—8		
5,15390	1940,28	P (18)	5,24195	1907,69	P (7)
5,16527	1936,00	P (19)	5,25250	1903,85	P (8)
5,17681	1931,69	P (20)	5,26310	1900,02	P (9)
5,18848	1927,35	P (21)	5,27380	1896,17	P (10)
5,20026	1922,98	P (22)	5,28465	1892,27	P (11)
5,21218	1918,58	P (23)	5,29570	1888,32	P (12)
5,22422	1914,16	P (24)	5,30695	1884,32	P (13)
5,23649	1909,68	P (25)	5,31820	1880,33	P (14)
5,24882	1905,19	P (26)	5,32964	1876,30	P (15)
5,26137	1900,66	P (27)	5,34127	1872,21	P (16)
5,27396	1896,11	P (28)	5,35298	1868,12	P (17)
Полоса 7—6			5,36485	1863,98	P (18)
5,10410	1959,21	P (7)	5,37692	1859,80	P (19)
5,11418	1955,35	P (8)	5,38906	1855,61	P (20)
5,12445	1951,43	P (9)	5,40138	1851,38	P (21)
5,13485	1947,48	P (10)	5,41385	1847,11	P (22)
5,14530	1943,52	P (11)	5,42648	1842,82	P (23)
5,15595	1939,51	P (12)	5,43926	1838,49	P (24)
5,16666	1935,49	P (13)	5,45225	1834,11	P (25)
5,17765	1931,38	P (14)	5,46533	1829,72	P (26)
5,18865	1927,28	P (15)	5,47852	1825,31	P (27)
5,19980	1923,15	P (16)	5,49191	1820,86	P (28)
5,21110	1918,98	P (17)	Полоса 10—9		
5,22256	1914,77	P (18)	5,32415	1878,23	P (8)
5,23420	1910,51	P (19)	5,33490	1874,45	P (9)
5,24590	1906,25	P (20)	5,34590	1870,59	P (10)
5,25776	1901,95	P (21)	5,35695	1866,73	P (11)
5,26981	1897,60	P (22)	5,36820	1862,82	P (12)
5,28189	1893,26	P (23)	5,37950	1858,91	P (13)
5,29423	1888,85	P (24)	5,39110	1854,91	P (14)
5,30674	1884,40	P (25)	5,40274	1850,91	P (15)
5,31924	1879,97	P (26)	5,41457	1846,87	P (16)
5,33204	1875,45	P (27)	5,42651	1842,80	P (17)
5,34494	1870,93	P (28)	5,45087	1834,57	P (19)
Полоса 8—7			5,46328	1830,40	P (20)
5,17220	1933,41	P (7)	5,47582	1826,21	P (21)
5,18250	1929,57	P (8)	5,48850	1821,99	P (22)
5,19290	1925,71	P (9)	5,50138	1817,73	P (23)
5,20345	1921,80	P (10)	5,51442	1813,43	P (24)
5,21410	1917,88	P (11)	5,52762	1809,10	P (25)
5,22498	1913,88	P (12)	5,54091	1804,76	P (26)
5,23600	1909,85	P (13)	5,55438	1800,38	P (27)
5,24710	1905,81	P (14)	Полоса 11—10		
5,25835	1901,74	P (15)	5,4080	1849,11	P (9)
5,26966	1897,66	P (16)	5,4196	1845,15	P (10)
5,28118	1893,52	P (17)	5,4299	1841,65	P (11)
5,29284	1889,34	P (18)	5,4425	1837,40	P (12)
5,30467	1885,13	P (19)	5,45402	1833,51	P (13)
5,31663	1880,90	P (20)	5,46571	1829,59	P (14)
5,32871	1876,63	P (21)	5,47763	1825,61	P (15)
5,34095	1872,33	P (22)	5,48968	1821,60	P (16)
5,35334	1867,99	P (23)	5,50189	1817,56	P (17)
5,36585	1863,64	P (24)	5,51421	1813,50	P (18)
5,37860	1859,22	P (25)	5,52667	1809,41	P (19)
5,39141	1854,80	P (26)	5,53927	1805,29	P (20)
5,40442	1850,34	P (27)	5,55207	1801,13	P (21)
5,41751	1854,87	P (28)	5,56503	1796,94	P (22)

$\lambda_{\text{вак}}, \text{мкм}$	$\nu, \text{см}^{-1}$	Переход	$\lambda_{\text{вак}}, \text{мкм}$	$\nu, \text{см}^{-1}$	Переход
5,59147	1788,44	P (24)	Полоса 16—15		
5,60494	1784,14	P (25)	5,89450	1696,50	P (16)
Полоса 12—11			5,90789	1692,65	P (17)
5,4842	1823,41	P (9)	5,92156	1688,74	P (18)
5,4946	1819,96	P (10)	5,94923	1680,89	P (20)
5,5072	1815,81	P (11)	5,96338	1676,90	P (21)
5,5187	1812,02	P (12)	5,97768	1672,89	P (22)
5,5299	1808,35	P (13)	Полоса 17—16		
5,5424	1804,28	P (14)	5,98177	1671,75	P (16)
5,57904	1792,42	P (17)	5,99553	1667,91	P (17)
5,59158	1788,40	P (18)	6,00939	1664,06	P (18)
5,60436	1784,33	P (19)	6,02348	1660,17	P (19)
5,61725	1780,23	P (20)	6,03774	1656,25	P (20)
5,64350	1771,95	P (22)	Полоса 18—17		
5,65687	1767,76	P (23)	6,05755	1650,83	P (15)
5,67044	1763,53	P (24)	6,07145	1647,05	P (16)
5,68414	1759,28	P (25)	6,0856	1643,22	P (17)
Полоса 13—12			6,09961	1639,45	P (18)
5,5971	1786,64	P (12)	6,12845	1631,73	P (20)
5,6087	1782,95	P (13)	Полоса 19—18		
5,63304	1775,24	P (15)	6,14904	1626,27	P (15)
5,65816	1767,36	P (17)	6,16288	1622,62	P (16)
5,67098	1763,36	P (18)	6,17712	1618,88	P (17)
5,68396	1759,34	P (19)	6,1924	1614,88	P (18)
5,69712	1755,27	P (20)	6,2068	1611,14	P (19)
5,71042	1751,18	P (21)	Полоса 20—19		
5,73754	1742,91	P (23)	6,24320	1601,74	P (15)
5,75142	1738,70	P (24)	6,25712	1598,18	P (16)
Полоса 14—13			6,27228	1594,32	P (17)
5,6546	1769,18	P (10)	6,2870	1590,58	P (18)
5,6654	1765,10	P (11)	Полоса 21—20		
5,6780	1761,18	P (12)	6,3260	1580,78	P (14)
5,71361	1750,21	P (15)	6,33936	1577,45	P (15)
5,72642	1746,29	P (16)	6,3552	1573,51	P (16)
5,73931	1742,37	P (17)	6,38476	1566,23	P (17)
5,75243	1738,40	P (18)	Полоса 22—21		
5,77911	1730,37	P (20)	6,4252	1556,37	P (14)
5,79264	1726,33	P (21)	6,43968	1552,87	P (15)
5,80636	1722,25	P (22)	6,45488	1549,22	P (16)
5,82031	1718,12	P (23)	6,4704	1545,50	P (17)
5,83441	1713,97	P (24)	Полоса 23—22		
5,84874	1709,77	P (25)	6,5120	1535,63	P (13)
Полоса 15—14			6,5268	1532,14	P (14)
5,78346	1729,07	P (14)	6,5424	1528,49	P (15)
5,79633	1725,23	P (15)	6,5584	1524,76	P (16)
5,80927	1721,39	P (16)	Полоса 24—23		
5,83581	1713,56	P (18)	6,6476	1504,30	P (15)
5,84935	1709,59	P (19)	6,6632	1500,78	P (16)
5,86300	1705,61	P (20)			
5,87689	1701,58	P (21)			
5,89088	1697,54	P (22)			
5,90507	1693,46	P (23)			
5,91951	1689,33	P (24)			

$\lambda_{\text{ВВК}}, \text{мкм}$	$\nu, \text{см}^{-1}$	Переход $\text{H}^{79}\text{Br} \rightarrow \text{H}^{81}\text{Br}$		$\lambda_{\text{ВВК}}, \text{мкм}$	$\nu, \text{см}^{-1}$	Переход $\text{H}^{79}\text{Br} \rightarrow \text{H}^{81}\text{Br}$	
(3а) НВг-лазер				Полоса 4—3			
Полоса 1—0				Полоса 4—3			
4,0170	2489,40	P (4)	—	4,5330	2206,07	P (5)	—
4,0176	2489,05	—	P (4)	4,5335	2205,81	—	P (5)
4,0470	2470,97	P (5)	—	4,5691	2188,61	P (6)	—
4,0475	2470,63	—	P (5)	4,5696	2188,35	—	P (6)
4,0783	2452,03	P (6)	—	4,6070	2170,61	P (7)	—
4,0788	2451,68	—	P (6)	4,6076	2170,35	—	P (7)
4,1107	2432,70	P (7)	—	4,6463	2152,27	P (8)	—
4,1112	2432,36	—	P (7)	4,6467	2152,04	—	P (8)
4,1442	2412,99	P (8)	—	(3б) Чисто вращательные переходы			
4,1448	2412,68	—	P (8)	$v = 0$			
4,1796	2392,56	—	P (9)	19,399	515,49	—	R (33)
Полоса 2—1				20,360	491,16	R (31) или	R (31)
4,1653	2400,78	P (4)	—	20,896	478,56	R (30)	—
4,1658	2400,47	—	P (4)	20,949	477,35	—	R (30)
4,1970	2382,68	P (5)	—	21,501	465,09	R (29) или	R (29)
4,1975	2382,35	—	P (5)	22,136	451,75	—	R (28)
4,2295	2364,36	P (6)	—	30,948	323,12	R (19) или	R (19)
4,2633	2345,58	P (7)	—	32,469	307,99	R (18) или	R (18)
4,2639	2345,26	—	P (7)	$v = 1$			
4,2988	2326,23	P (8)	—	19,988	500,30	R (33) или	R (33)
4,2994	2325,92	—	P (8)	21,546	464,12	R (30)	—
4,3354	2306,60	P (9)	—	30,445	328,46	R (20) или	R (20)
4,3359	2306,30	—	P (9)	31,849	313,98	R (19) или	R (19)
Полоса 3—2				33,409	299,32	R (18) или	R (18)
4,3250	2312,15	P (4)	—	$v = 2$			
4,3255	2311,85	—	P (4)	22,226	449,92	R (30)	—
4,3579	2294,68	P (5)	—	22,855	437,54	R (29) или	R (29)
4,3585	2294,39	—	P (5)	31,368	318,80	R (20) или	R (20)
4,3925	2276,61	P (6)	—	32,799	304,89	R (19)	—
4,3931	2276,32	—	P (6)	40,526	246,76	R (15) или	R (15)
4,4281	2258,29	P (7)	—	$v = 3$			
4,4307	2258,00	—	P (7)	29,786	335,73	—	R (22)
4,4652	2239,52	P (8)	—	23,436	426,69	—	—
4,4658	2239,26	—	P (8)				
4,5041	2220,20	P (9)	—				
4,5047	2219,92	—	P (9)				
$\lambda_{\text{ВВК}}, \text{мкм}$	$\nu, \text{см}^{-1}$	Переход $\text{D}^{79}\text{Br} \rightarrow \text{D}^{81}\text{Br}$		$\lambda_{\text{ВВК}}, \text{мкм}$	$\nu, \text{см}^{-1}$	Переход $\text{D}^{79}\text{Br} \rightarrow \text{D}^{81}\text{Br}$	
(3в) DBr-лазер				Полоса 4—3			
Полоса 2—1				5,9261	1687,45	—	P (7)
				5,9573	1678,60	P (8)	—
				5,9590	1678,13	—	P (8)
5,8049	1722,67	P (8)	—	Полоса 4—3			
Полоса 3—2				6,0209	1660,88	P (5)	—
5,8620	1705,91	P (5)	—	6,0225	1660,45	—	P (5)
5,8626	1705,43	—	P (5)	6,0529	1652,10	P (6)	—
5,8928	1696,98	P (6)	—	6,0544	1651,69	—	P (6)
5,8944	1696,52	—	P (6)	6,0858	1643,18	P (7)	—
5,9246	1687,89	P (7)	—	6,0873	1642,76	—	P (7)

$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход $D^{79}\text{Br } D^{81}\text{Br}$		$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход $D^{79}\text{Br } D^{81}\text{Br}$	
6,1200	1634,00	$P(8)$	—	Полоса 5—4			
6,1216	1633,57	—	$P(8)$	6,2237	1606,75	—	$P(6)$
6,1546	1624,80	$P(9)$	—	6,2566	1598,32	$P(7)$	—
6,1562	1624,39	—	$P(9)$	6,2581	1597,93	—	$P(7)$
6,1903	1615,42	$P(10)$	—	6,2916	1589,41	$P(8)$	—
6,1918	1615,03	—	$P(10)$	6,2932	1589,01	—	$P(8)$
6,2272	1605,85	$P(11)$	—	6,3279	1580,31	$P(9)$	—
6,2289	1605,43	—	$P(11)$	6,3294	1579,92	—	$P(9)$

$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход $\text{H}^{35}\text{Cl } \text{H}^{37}\text{Cl}$		$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход $\text{H}^{35}\text{Cl } \text{H}^{37}\text{Cl}$	
(4а) HCl-лазер				19,122	522,96	—	$R(26)$
Полоса 2—1				20,4106	489,949	$R(24)$	—
3,7071	2697,52	$P(4)$	—	21,1556	472,701	$R(23)$	—
3,7383	2675,01	$P(5)$	—	21,9706	455,175	$R(22)$	—
3,7408	2673,23	—	$P(5)$	22,8637	437,380	$R(21)$	—
3,7710	2651,82	$P(6)$	—	23,8485	419,326	$R(20)$	—
3,7735	2650,08	—	$P(6)$	24,9367	401,023	$R(19)$	—
3,8050	2628,13	$P(7)$	—	26,1462	382,483	$R(18)$	—
3,8074	2626,45	—	$P(7)$	27,508	363,53	$R(17)$	—
3,8401	2604,09	$P(8)$	—	$v = 1$			
3,8425	2602,48	—	$P(8)$	16,765	596,48	—	$R(32)$
3,8768	2579,42	$P(9)$	—	17,125	583,94	$R(31)$	—
3,9149	2554,34	$P(10)$	—	17,575	568,99	$R(30)$	—
Полоса 3—2				18,035	554,48	$R(29)$	—
3,8509	2596,79	$P(4)$	—	18,555	538,94	$R(28)$	—
3,8840	2574,70	$P(5)$	—	18,593	537,84	—	$R(28)$
3,9181	2552,26	$P(6)$	—	19,145	522,33	—	$R(27)$
3,9205	2550,70	—	$P(6)$	19,7002	507,628	$R(26)$	—
3,9536	2529,31	$P(7)$	—	20,3455	491,526	$R(25)$	—
3,9560	2527,79	—	$P(7)$	21,0470	475,130	$R(24)$	—
3,9909	2505,68	$P(8)$	—	21,8127	458,449	$R(23)$	—
4,0295	2481,69	$P(9)$	—	22,6514	441,491	$R(22)$	—
(4б) Чисто вращательные переходы				23,5705	424,268	$R(21)$	—
$v = 0$				24,6177	406,215	—	$R(20)$
13,8720	720,921	$R(40)$	—	24,5833	406,789	$R(20)$	—
14,0994	709,279	$R(39)$	—	25,7040	389,065	$R(19)$	—
14,3434	697,232	$R(38)$	—	$v = 2$			
16,2125	616,809	$R(32)$	—	19,183	521,29	$R(28)$	—
16,6085	602,114	$R(31)$	—	20,9991	476,215	$R(26)$	—
16,664	600,10	—	$R(31)$	24,3178	411,232	$R(21)$	—
17,0340	587,070	$R(30)$	—	$v = 3$			
17,4923	571,686	$R(29)$	—	19,783	505,48	$R(28)?$	—
17,9874	555,969	$R(28)$	—	19,821	504,52	—	—
17,997	555,65	—	$R(28)$				
18,522	539,928	$R(27)$	—				

$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход $D^{35}\text{Cl } D^{37}\text{Cl}$		$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход $D^{35}\text{Cl } D^{37}\text{Cl}$	
(4в) DCl-лазер				5,0743	1970,72	$P(6)$	—
Полоса 2—1				5,0811	1968,08	—	$P(6)$
5,0445	1982,35	$P(5)$	—	5,1049	1958,90	$P(7)$	—
5,0514	1979,65	—	$P(5)$	5,1118	1956,25	—	$P(7)$
				5,1363	1946,94	$P(8)$	—

$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход $D^{35}\text{Cl } D^{37}\text{Cl}$		$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход $D^{35}\text{Cl } D^{37}\text{Cl}$	
5,1431 5,1688	1944,35 1934,67	— $P(9)$	$P(8)$ —	Полоса 4—3			
Полоса 3—2				5,3244 5,3562 5,3629 5,3889 5,3956 5,4295 5,4577 5,4935 5,5304	1878,13 1867,01 1864,65 1855,66 1853,36 1841,79 1832,27 1820,34 1808,20	$P(5)$ $P(6)$ — $P(7)$ — — $P(9)$ $P(10)$ $P(11)$	— — $P(6)$ — $P(7)$ $P(8)$ — — —
5,1511 5,1811 5,1879 5,2118 5,2186 5,2435 5,2503 5,2760 5,2829 5,3097 5,3443 5,3799	1941,35 1930,10 1927,56 1918,73 1916,24 1907,13 1904,67 1895,37 1892,91 1883,35 1871,15 1858,77	$P(4)$ $P(5)$ — $P(6)$ — $P(7)$ — $P(8)$ — $P(9)$ $P(10)$ $P(11)$	— — $P(5)$ — $P(6)$ — $P(7)$ — $P(8)$ — — —	Полоса 5—4			
				5,5084 5,5423 5,5776 5,6137	1815,38 1804,31 1792,89 1781,36	$P(6)$ $P(7)$ $P(8)$ $P(9)$	— — — —

$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход	$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход
(5а) HF-лазер			3,0051 3,0482	3327,73 3280,64	$P(7)$ $P(8)$
Полоса 1—0			(5б) Чисто вращательные переходы		
2,640 2,673 2,7075 2,7441 2,7826 2,8231 2,8657 2,9103 2,9573 3,0064 3,0582 3,1125	3788 3741 3693,50 3644,16 3593,80 3542,20 3489,59 3436,12 3381,50 3326,21 3269,90 3212,80	$P(4)$ $P(5)$ $P(6)$ $P(7)$ $P(8)$ $P(9)$ $P(10)$ $P(11)$ $P(12)$ $P(13)$ $P(14)$ $P(15)$	$\nu = 0$		
			10,1978 10,4578 10,7439 11,0573 11,4033 11,7854 12,2082 12,6781 13,2009 13,7841 14,4406 16,0215 16,975 18,085	980,60 956,23 930,76 904,38 876,94 848,50 819,12 788,76 757,52 725,47 692,49 624,16 589,10 552,94	$R(27)$ $R(26)$ $R(25)$ $R(24)$ $R(23)$ $R(22)$ $R(21)$ $R(20)$ $R(19)$ $R(18)$ $R(17)$ $R(15)$ $R(14)$ $R(13)$
Полоса 2—1			$\nu = 1$		
2,6962 2,7275 2,7604 2,7953 2,8318 2,8706 2,9111 2,9539 2,9989 3,0461 3,0958 3,1480 3,2029 3,2603	3708,86 3666,38 3622,71 3577,47 3531,31 3483,63 3435,17 3385,34 3334,55 3282,86 3230,18 3176,60 3122,14 3067,22	$P(2)$ $P(3)$ $P(4)$ $P(5)$ $P(6)$ $P(7)$ $P(8)$ $P(9)$ $P(10)$ $P(11)$ $P(12)$ $P(13)$ $P(14)$ $P(15)$	12,2619 12,7006 13,1877 13,7277 15,0163 16,655 17,645 18,8010 20,1337 21,6986	815,53 787,37 758,28 728,45 665,94 600,42 566,73 531,89 496,68 460,86	$R(22)$ $R(21)$ $R(20)$ $R(19)$ $R(17)$ $R(16)$ $R(15)$ $R(13)$ $R(12)$ $R(11)$
Полоса 3—2			$\nu = 2$		
2,8213 2,8540 2,8889 2,9256 2,9643	3544,51 3503,80 3461,54 3418,16 3373,46	$P(2)$ $P(3)$ $P(4)$ $P(5)$ $P(6)$	10,5819 10,8117	945,01 924,93	$R(29)$ $R(28)$

726

$\lambda_{\text{вак}}, \text{Мкм}$	$\nu, \text{см}^{-1}$	Переход	$\lambda_{\text{вак}}, \text{Мкм}$	$\nu, \text{см}^{-1}$	Переход
0,160594	62269,0	(6—13) $R(0)$	(7) NO-лазер, переходы в основных электронных состояниях $^2\Pi_{1/2}$ и $^2\Pi_{3/2}$		
0,160623	62257,4	(4—11) $P(2)$	Полоса 6—5		
0,160829	62177,7	(6—13) $P(2)$	5,8462	1710,52	$2\pi_{3/2} P(7)$
0,160961	62126,7	(6—13) $P(4)$	5,8549	1707,98	$2\pi_{1/2} P(8)$
0,161033	62099,2	(5—12) $P(1)$	5,8584	1706,95	$2\pi_{3/2} P(8)$
0,161091	62076,7	(4—11) $P(4)$	5,8706	1703,41	$2\pi_{3/2} P(9)$
0,161165	62048,1	(5—12) $P(2)$	5,8789	1700,99	$2\pi_{1/2} P(10)$
0,161318	61989,2	(5—12) $P(3)$	5,9036	1693,88	$2\pi_{1/2} P(12)$
0,161485	61925,1	(5—12) $P(4)$	5,9083	1692,53	$2\pi_{3/2} P(12)$
HD, переходы в системе $B^1\Sigma_u^+ - X^1\Sigma_g^+$			5,9550	1679,3	$2\pi_{1/2} P(16)$
0,157242	63596	(9—16) $P(2), P(3)$	Полоса 7—6		
0,159524	62686	(4—12) $P(2)$	5,9423	1682,84	$2\pi_{3/2} P(7)$
0,159713	62612	(4—12) $P(3)$	5,9546	1679,37	$2\pi_{3/2} P(8)$
0,160365	62358	(5—13) $P(1)$	5,9632	1676,96	$2\pi_{1/2} P(9)$
0,160496	62307	(5—13) $P(2)$	5,9673	1675,81	$2\pi_{3/2} P(9)$
0,160569	62278	(7—15) $P(1)$	5,9756	1673,46	$2\pi_{1/2} P(10)$
0,160631	62254	(7—15) $P(2)$	5,9799	1672,27	$2\pi_{3/2} P(10)$
0,160646	62248	(5—13) $P(3)$	5,9882	1669,96	$2\pi_{1/2} P(11)$
0,160692	62231	(7—15) $P(3)$	5,9931	1668,59	$2\pi_{3/2} P(11)$
0,160747	62209	(7—15) $P(4)$	6,0010	1666,39	$2\pi_{1/2} P(12)$
0,160794	62191	(6—14) $P(1)$	6,0054	1665,18	$2\pi_{3/2} P(12)$
0,160827	62179	(5—13) $P(4)$	6,0192	1661,36	$2\pi_{3/2} P(13)$
0,160893	62153	(6—14) $P(2)$	6,0267	1659,29	$2\pi_{1/2} P(14)$
0,161005	62110	(6—14) $P(3)$	6,0324	1657,71	$2\pi_{3/2} P(14)$
0,161131	62061	(6—14) $P(4)$	6,0402	1655,58	$2\pi_{1/2} P(15)$
D ₂ , переходы в системе $B^1\Sigma_u^+ - X^1\Sigma_g^+$			Полоса 8—7		
0,158675	63021	(10—19) $P(2)$	6,0386	1656,0	$2\pi_{1/2} P(7)$
0,158694	63014	(10—19) $P(3)$	6,0419	1655,12	$2\pi_{3/2} P(7)$
0,158714	63004	(10—19) $P(4)$	6,0543	1651,72	$2\pi_{3/2} P(8)$
0,159130	62841	(9—18) $P(2)$	6,0628	1649,40	$2\pi_{1/2} P(9)$
0,159257	62792	(9—18) $P(4)$	6,0673	1648,19	$2\pi_{3/2} P(9)$
0,160086	62466	(5—15) $P(2)$	6,0801	1644,71	$2\pi_{3/2} P(10)$
0,160354	62360	(5—15) $P(4)$	6,0884	1642,47	$2\pi_{1/2} P(11)$
0,160848	62170	(6—16) $P(2)$	6,0934	1641,13	$2\pi_{3/2} P(11)$
0,161080	62080	(6—16) $P(4)$	6,1015	1638,95	$2\pi_{1/2} P(12)$
0,161198	62035	(8—18) $P(2)$	6,1204	1633,87	$2\pi_{3/2} P(13)$
0,161236	60020	(7—17) $P(2)$	6,1417	1628,22	$2\pi_{1/2} P(15)$
0,161251	62014	(8—18) $P(2)$	6,1546	1624,8	$2\pi_{1/2} P(16)$
0,161320	61990	(8—18) $P(4)$	6,1973	1613,6	$2\pi_{1/2} P(19)$
0,161412	61951	(7—17) $P(4)$	Полоса 9—8		
(6в) H ₂ -лазер, переходы в системе ($B^1\Sigma_u^+ - X^1\Sigma_u^+$)			6,1538	1625,02	$2\pi_{1/2} P(8)$
0,158074	63262	(7—13) $P(3)$	6,1576	1624,00	$2\pi_{3/2} P(8)$
0,159606	62654	(3—10) $P(3)$	6,1663	1621,72	$2\pi_{1/2} P(9)$
0,160044	62483	—	6,1792	1618,34	$2\pi_{1/2} P(10)$
0,160448	62325	(4—11) $P(1)$			
0,160750	62208	(6—13) $P(1)$			
0,160839	62174	(4—11) $P(3)$			
0,160902	62150	(6—13) $P(3)$			
0,161033	62099	(5—12) $P(1)$			
0,161165	62048	(5—12) $P(2)$			
0,161318	61989	(5—12) $P(3)$			

$\lambda_{\text{вак}}, \text{мкм}$	$\nu, \text{см}^{-1}$	Переход	$\lambda_{\text{вак}}, \text{мкм}$	$\nu, \text{см}^{-1}$	Переход
6,1838	1617,12	$2\pi_{3/2} P (10)$	0,749189	13 347,76	$PQ_{23} (7)$
6,1921	1614,95	$2\pi_{1/2} P (11)$	0,749377	13 344,42	$Q_1 (7)$
6,1972	1613,63	$2\pi_{3/2} P (11)$	0,749775	13 337,34	$Q_1 (5)$
6,2055	1611,48	$2\pi_{1/2} P (12)$	0,750363	13 326,88	$P_1 (11)$
6,2110	1610,06	$2\pi_{3/2} P (12)$	Полоса 3—1		
6,2191	1607,94	$2\pi_{1/2} P (13)$			
6,2249	1606,46	$2\pi_{3/2} P (13)$			
Полоса 10—9			0,757434	13 202,47	—
6,2381	1603,06	$2\pi_{3/2} P (6)$	0,758313	13 187,16	$Q_3 (13)$
6,2511	1599,71	$2\pi_{3/2} P (7)$	0,758632	13 181,62	$Q_3 (11)$
6,2602	1597,39	$2\pi_{1/2} P (8)$	0,758855	13 177,75	$Q_3 (9)$
6,2645	1596,30	$2\pi_{3/2} P (8)$	0,759199	13 171,78	—
6,2778	1592,91	$2\pi_{3/2} P (9)$	0,759524	13 166,14	$Q_1 (15)$
6,2865	1590,71	$2\pi_{1/2} P (10)$	0,760079	13 156,52	$Q_1 (13)$
6,2913	1589,50	$2\pi_{3/2} P (10)$	0,760608	13 147,37	$Q_1 (11)$
6,2998	1587,36	$2\pi_{1/2} P (11)$	0,761091	13 139,03	$Q_1 (9)$
6,3051	1586,02	$2\pi_{3/2} P (11)$	0,761195	13 137,24	$PQ_{23} (5)$
6,3136	1583,88	$2\pi_{1/2} P (12)$	0,761535	13 131,37	$Q_1 (7)$
6,3191	1582,50	$2\pi_{3/2} P (12)$	0,761946	13 124,29	$Q_1 (5)$
6,3274	1580,43	$2\pi_{1/2} P (13)$	0,762506	13 114,65	$PQ_{12} (11)$
6,3336	1578,89	$2\pi_{3/2} P (13)$	0,762631	13 112,50	$PQ_{12} (9)$
Полоса 11—10			0,762721	13 110,95	$PQ_{12} (7)$
6,3764	1568,29	$2\pi_{3/2} P (8)$	Полоса 2—0		
6,3894	1565,09	$2\pi_{3/2} P (9)$	0,771418	12 963,14	$Q_3 (9)$
6,3980	1562,99	$2\pi_{1/2} P (10)$	0,774602	12 909,86	$Q_1 (5)$
6,4031	1561,74	$2\pi_{3/2} P (10)$	0,775483	12 891,87	$P_{R13} (1)$
6,4262	1556,14	$2\pi_{1/2} P (12)$	Полоса 2—1		
6,4321	1554,71	$2\pi_{3/2} P (12)$	0,865569	11 553,10	$R_3 (7)$
(8а) N_2 -лазер, переходы во второй положительной системе $C^3 \Pi_u - B^3 \Pi_g$			0,865730	11 550,95	$Q_3 (15)$
Полоса 0—0			0,866327	11 542,98	$Q_3 (13)$
0,337141	29 661,22	—	0,866494	11 540,76	$Q_3 (15)$
0,337178	29 657,92	—	0,866583	11 539,57	$Q_3 (12)$
0,337211	29 655,03	—	0,866810	11 536,55	$Q_3 (11)$
0,337240	29 652,46	—	0,86700	11 534,0	$Q_3 (10)$
Полоса 0—1			0,867161	11 531,88	$Q_3 (9)$
0,357661	27 959,42	—	0,867197	11 531,41	$Q_2 (13)$
0,357713	27 955,34	—	0,867371	11 529,09	$Q_3 (7)$
(8б) Переходы в первой положительной системе $(B^3 \Pi_g - A^3 \Sigma_u^+)^*$			0,867793	11 523,48	$Q_2 (11)$
Полоса 4—2			0,868520	11 513,84	$R_1 (7)$
0,748480	13 360,41	$Q_1 (11)$	0,868613	11 512,61	$Q_1 (13)$
0,748948	13 352,07	$Q_1 (9)$	0,869001	11 507,46	$Q_1 (12)$
			0,869375	11 502,52	$Q_1 (11)$
			0,869729	11 497,84	$Q_1 (10)$
			0,870067	11 493,37	$Q_1 (9)$
			0,870307	11 490,20	$PQ_{23} (5)$
			0,870388	11 489,13	$Q_1 (8)$
			0,870494	11 487,73	$PQ_{23} (7)$
			0,870570	11 486,73	$PQ_{23} (11)$
			0,870696	11 485,06	$Q_1 (7)$

* Переходы обозначены по K , а не по J . Верхние знаки O, P, R обозначают соответственно $\Delta K = -2, -1, +1$. В остальных случаях $\Delta K = 0$. Нижние цифры указывают спиновые уровни.

$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход	$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход
0,870986	11 481,24	Q_1 (6)	1,045806	9562,00	Q_1 (12)
0,871267	11 477,54	Q_1 (5)	1,046404	9556,54	Q_1 (11)
0,871533	11 474,03	Q_1 (4)	1,046956	9551,55	Q_1 (10)
0,871690	11 471,97	P_1 (13)	1,047482	9546,70	Q_1 (9)
0,871792	11 470,63	Q_1 (3)	1,047979	9542,18	Q_1 (8)
0,871884	11 469,41	$P_{Q_{12}}$ (11)	1,048249	9539,72	$P_{Q_{23}}$ (7)
0,871977	11 468,19	P_1 (11)	1,048464	9537,79	Q_1 (7)
0,872106	11 466,50	$P_{Q_{12}}$ (9)	1,048922	9533,60	Q_1 (6)
0,872193	11 465,35	P_1 (9)	1,049348	9529,73	Q_1 (5)
0,872266	11 464,40	$P_{Q_{12}}$ (7)	1,049766	9525,93	Q_1 (4)
0,872374	11 462,97	$P_{Q_{12}}$ (5)	1,050161	9522,35	Q_1 (3)
0,872460	11 461,84	$P_{Q_{12}}$ (3)	1,050519	9519,10	$P_{Q_{12}}$ (9)
Полоса 1—0			1,050800	9516,56	$P_{Q_{12}}$ (7)
0,883620	11 317,08	—	1,051005	9514,70	$P_{Q_{12}}$ (5)
0,884372	11 307,46	Q_3 (15)	1,051118	9513,68	$P_{Q_{12}}$ (3)
0,884662	11 303,75	—	1,052548	9500,75	Q_{13} (3)
0,885001	11 299,42	Q_3 (13)	1,052911	9497,48	$Q_{P_{12}}$ (5)
0,885163	11 297,36	Q_2 (15)	1,053382	9493,23	$Q_{P_{12}}$ (7)
0,885269	11 296,00	Q_3 (12)	1,053760	9489,83	$Q_{P_{12}}$ (9)
0,885504	11 293,01	Q_3 (11)	Полоса 0—1		
0,885704	11 290,46	Q_3 (10)	1,230598	8126,13	Q_1 (11)
0,885872	11 288,31	Q_3 (9)	1,231430	8120,64	Q_1 (10)
0,885893	11 288,04	Q_2 (13)	1,232219	8115,44	Q_1 (9)
0,885998	11 286,71	Q_3 (8)	1,232962	8110,55	Q_1 (8)
0,886090	11 285,53	Q_3 (7)	1,233671	8105,89	Q_1 (7)
0,886093	11 285,50	Q_3 (5), R_1 (9)	1,234332	8101,55	Q_1 (6)
0,886397	11 281,63	$R_{Q_{21}}$ (5)	1,234969	8097,37	Q_1 (5)
0,886500	11 280,32	Q_1 (15)	(8в) Переходы в системе $a^1\Pi_g - a'^1\Sigma_u^-$		
0,886522	11 280,04	Q_2 (11)	Полоса 2—1		
0,886941	11 274,71	Q_1 (14)	3,29463	3035,24	Q (14)
0,887043	11 273,41	Q_2 (9)	3,30149	3028,94	Q (12)
0,887365	11 269,32	Q_1 (13)	3,30734	3023,58	Q (10)
0,887775	11 264,12	Q_1 (12)	3,30989	3021,25	Q (9)
0,888162	11 259,21	Q_1 (11)	3,31221	3019,13	Q (8)
0,888532	11 254,52	Q_1 (10)	3,31426	3017,27	Q (7)
0,888684	11 250,06	Q_1 (9)	3,31607	3015,62	Q (6)
0,889150	11 246,69	$P_{Q_{23}}$ (5)	3,31760	3014,23	Q (5)
0,889219	11 245,82	Q_1 (8)	3,31889	3013,06	Q (4)
0,889358	11 244,06	$P_{Q_{23}}$ (7)	3,32069	3011,43	Q (2)
0,889460	11 242,78	$P_{Q_{23}}$ (9)	Полоса 1—0		
0,889539	11 241,78	Q_1 (7)	3,45184	2897,01	Q (12)
0,889846	11 237,90	Q_1 (6)	3,45832	2891,56	Q (10)
0,890137	11 234,23	Q_1 (5)	3,46114	2889,22	Q (9)
0,890420	11 230,66	Q_1 (4)	3,46368	2887,10	Q (8)
0,890617	11 228,17	P_1 (13)	3,46596	2885,20	Q (7)
0,890688	11 227,28	Q_1 (3)	3,46795	2883,55	Q (6)
0,890811	11 225,72	$P_{Q_{12}}$ (11)	3,46967	2882,12	Q (5)
0,890911	11 224,47	P_1 (11)	3,47109	2880,94	Q (4)
0,891038	11 222,87	$P_{Q_{12}}$ (9)	Полоса 0—0		
0,891135	11 221,65	P_1 (9)	8,1483	1227,25	Q (10)
0,891199	11 220,84	$P_{Q_{12}}$ (7)	8,1827	1222,09	Q (8)
0,891308	11 219,47	$P_{Q_{12}}$ (5), P_1 (7)	8,2102	1217,99	Q (6)
0,891373	11 218,65	$P_{Q_{12}}$ (3)			
Полоса 0—0					
1,043874	9579,70	Q_1 (15)			
1,044548	9573,52	Q_1 (14)			
1,045189	9567,68	Q_1 (13)			

$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход	$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход
(8г) Переходы в системе $\omega^1\Delta_u - a^1\Pi_g$					
Полоса 0—0					
3,62349	2759,767	R (4)	3,64662	2742,269	Q (6)
3,62614	2757,752	R (3)	3,64883	2740,605	Q (7)
3,62910	2755,505	R (2)	3,65138	2738,693	Q (8)
3,64313	2744,891	Q (4)	3,65424	2736,550	Q (9)
3,64472	2743,697	Q (5)	3,65745	2734,148	Q (10)
			3,66095	2731,530	Q (11)
			3,66483	2728,637	Q (12)
			3,66899	2725,549	Q (13)
			3,67352	2722,186	Q (14)
			3,67834	2718,618	Q (15)

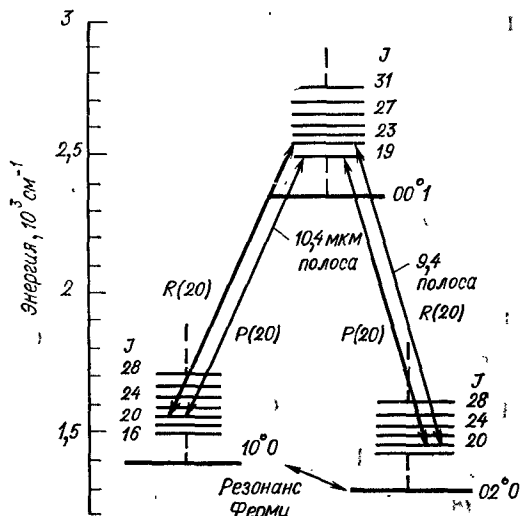


Рис. 33.33. Схема лазерных переходов для полос $(00^0 1) - (10^0 0)$ и $(00^0 1) - (02^0 0)$ молекулы CO_2 (включая вращательные уровни энергии) [5].

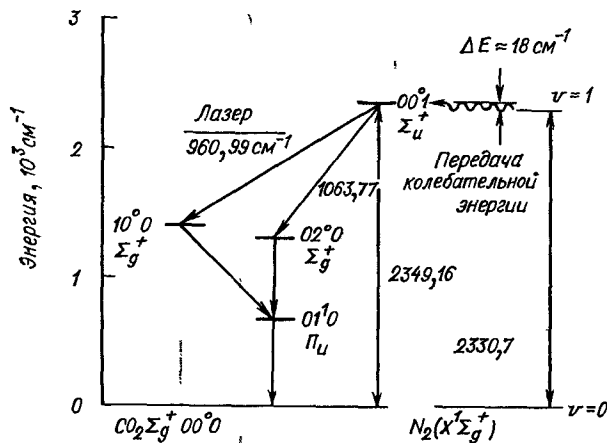


Рис. 33.34. Схема уровней энергии молекул N_2 и CO_2 по отношению к основным состояниям N_2 ($X^1\Sigma_g^+$, $v = 0$) и CO_2 ($00^0 0$). Молекулы CO_2 селективно возбуждаются в состояние $(00^0 1)$ при передаче колебательной энергии от молекул N_2^* ($v = 1$) [5].

Лазерные переходы в трехатомных молекулярных газах [4]

Таблица 33.5

$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход	$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход
CO_2-лазер (рис. 33.33 и 33.34)			(1б) Полоса $(00^0 1) - (02^0 0)$, R-ветвь		
(1а) Полоса $(10^0 2) - (10^0 1)$					
4,3203	2314,65	R (17)	9,126866	1095,6663	R (52)
4,3249	2312,18	R (13)	9,134184	1094,7885	R (50)
4,3276	2310,73	R (11)	9,141719	1093,8862	R (48)
4,3549	2296,25	P (7)	9,149471	1092,9593	R (46)
4,3580	2294,62	P (9)	9,157446	1092,0076	R (44)
4,3612	2292,94	P (11)	9,165645	1091,0307	R (42)
4,3644	2291,25	P (13)	9,174070	1090,0287	R (40)
4,3677	2289,51	P (15)	9,182725	1089,0014	R (38)
4,3711	2287,76	P (17)	9,191612	1087,9485	R (36)
4,3745	2286,00	P (19)	9,200733	1086,8699	R (34)
4,3779	2284,20	P (21)	9,210092	1085,7655	R (32)
4,3814	2282,38	P (23)	9,219690	1084,6352	R (30)
4,3849	2280,53	P (25)	9,229530	1083,4788	R (28)
			9,239615	1082,2962	R (26)
			9,249946	1081,0874	R (24)

$\lambda_{\text{вак}}, \text{мкм}$	$\nu, \text{см}^{-1}$	Переход	$\lambda_{\text{вак}}, \text{мкм}$	$\nu, \text{см}^{-1}$	Переход
9,260526	1079,8522	R (22)	10,182301	982,0962	R (30)
9,271358	1078,5906	R (20)	10,194574	980,9139	R (28)
9,282444	1077,3025	R (18)	10,207142	979,7061	R (26)
9,293786	1075,9878	R (16)	10,220006	978,4730	R (24)
9,305386	1074,6465	R (14)	10,233167	977,2146	R (22)
9,317246	1073,2785	R (12)	10,246625	975,9311	R (20)
9,329370	1071,8837	R (10)	10,260381	974,6226	R (18)
9,341758	1070,4623	R (8)	10,274438	973,2892	R (16)
9,354414	1069,0141	R (6)	10,288797	971,9309	R (14)
9,367339	1067,5391	R (4)	10,303458	970,5479	R (12)
			10,318424	969,1402	R (10)
			10,333696	967,7079	R (8)
			10,349277	966,2510	R (6)
			10,365168	964,7697	R (4)

(1в) Полоса $(00^0I) - (02^0O)$, P-ветвь(1д) Полоса $(00^0I) - (10^0O)$, P-ветвь

9,428886	1060,5706	P (4)
9,443328	1058,9487	P (6)
9,458052	1057,3002	P (8)
9,473060	1055,6251	P (10)
9,488355	1053,9235	P (12)
9,503937	1052,1956	P (14)
9,519808	1050,4413	P (16)
9,535972	1048,6608	P (18)
9,552428	1046,8542	P (20)
9,569179	1045,0217	P (22)
9,586227	1043,1633	P (24)
9,603573	1041,2791	P (26)
9,621219	1039,3693	P (28)
9,639166	1037,4341	P (30)
9,657416	1035,4736	P (32)
9,675971	1033,4881	P (34)
9,694831	1031,4775	P (36)
9,713998	1029,4423	P (38)
9,733474	1027,3824	P (40)
9,753259	1025,2983	P (42)
9,773356	1023,1900	P (44)
9,793764	1021,0578	P (46)
9,814487	1018,9020	P (48)
9,835523	1016,7227	P (50)
9,856876	1014,5202	P (52)
9,878544	1012,2949	P (54)
9,900531	1010,0469	P (56)
9,922835	1007,7765	P (58)
9,945458	1005,4841	P (60)

10,440579	957,8012	P (4)
10,458220	956,1857	P (6)
10,476187	954,5458	P (8)
10,494484	952,8816	P (10)
10,513114	951,1930	P (12)
10,532080	949,4800	P (14)
10,551387	947,7427	P (16)
10,571037	945,9810	P (18)
10,591035	944,1948	P (20)
10,611385	942,3841	P (22)
10,632090	940,5488	P (24)
10,653156	938,6890	P (26)
10,674586	936,8045	P (28)
10,696386	934,8952	P (30)
10,718560	932,9611	P (32)
10,741113	931,0022	P (34)
10,764052	929,0182	P (36)
10,787380	927,0091	P (38)
10,811105	924,9749	P (40)
10,835231	922,9153	P (42)
10,859765	920,8302	P (44)
10,884713	918,7197	P (46)
10,910082	916,5834	P (48)
10,935879	914,4212	P (50)
10,962110	912,2331	P (52)
10,988783	910,0188	P (54)
11,015906	907,7783	P (56)

(1г) Полоса $(00^0I) - (10^0O)$, R-ветвь(1е) Полоса $(01^1I) - (11^1O)$

10,057895	994,2438	R (54)
10,066650	993,3792	R (52)
10,075698	992,4870	R (50)
10,085041	991,5676	R (48)
10,094676	990,6211	R (46)
10,104605	989,6478	R (44)
10,114826	988,6477	R (42)
10,125340	987,6211	R (40)
10,136146	986,5682	R (38)
10,147246	985,4891	R (36)
10,158637	984,3840	R (34)
10,170323	983,2530	R (32)

10,9730	911,33	P (19)
10,9856	910,28	P (20)
10,9944	909,55	P (21)
11,0078	908,46	P (22)
11,0164	907,74	P (23)
11,0300	906,62	P (24)
11,0385	905,92	P (25)
11,0529	904,74	P (26)
11,0610	904,08	P (27)
11,0762	902,84	P (28)
11,0840	902,20	P (29)
11,0999	900,91	P (30)
11,1073	900,31	P (31)

$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход	$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход
11,1238	898,97	P (32)	(1з) C^{18}O_2 -лазер		
11,1309	898,40	P (33)	Полоса (00 ⁰ 1) — (10 ⁰ 0)		
11,1483	897,00	P (34)	9,341	1070,6	P (18)
(1ж) Полоса (01 ⁰ 1) — (03 ¹ 0)			9,355	1069,0	P (20)
10,9735	911,29	P (19)	9,369	1067,4	P (22)
10,9951	909,50	P (21)	9,383	1065,8	P (24)
11,0165	907,73	P (23)	9,397	1064,2	P (26)
11,0300	906,62	P (24)	(2) CS_2 -лазер		
11,0385	905,92	P (25)	Полоса (02 ⁰ 1) — (12 ⁰ 0)		
11,0535	904,69	P (26)	11,4823	870,90	P (28)
11,0610	904,08	P (27)	11,4893	870,38	P (30)
11,0760	902,85	P (28)	11,5962	869,85	P (32)
11,0850	902,12	P (29)	11,5031	869,33	P (34)
11,1000	900,90	P (30)	11,5099	868,82	P (36)
11,1070	900,33	P (31)	11,5166	868,31	P (38)
11,1235	899,00	P (32)	11,5237	867,80	P (40)
11,1315	898,35	P (33)	11,5307	867,27	P (42)
11,1485	896,98	P (34)	11,5376	866,73	P (44)
11,1555	896,42	P (35)	11,5446	866,20	P (46)
11,1736	894,97	P (36)			
11,1791	894,53	P (37)			
11,1980	893,02	P (38)			
11,2035	892,58	P (39)			
11,2235	890,99	P (40)			
11,2295	890,51	P (41)			
11,2495	888,93	P (42)			
11,2545	888,53	P (43)			
11,2770	886,76	P (44)			
11,2804	886,49	P (45)			

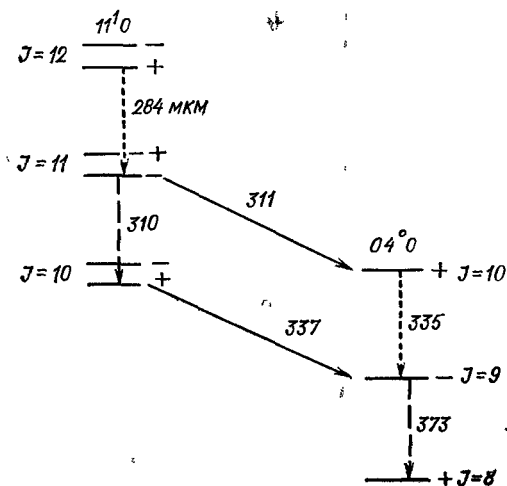


Рис. 33.35. Часть энергетических уровней молекулы HCN и соответствующие лазерные переходы в дальней инфракрасной области спектра [5].

(3а) HCN-лазер (рис. 33.35)			
$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход	
		колебательный	вращательный
12,85	778,2	—	—
71,899	139,084	—	—
73,101	136,796	—	—
76,093	131,418	—	—
77,001	129,868	—	—
81,554	122,618	—	—
96,401	103,733	—	—
98,693	101,325	—	—
101,257	98,759	—	—
112,066	89,233	—	—
116,132	86,109	—	—
126,164	79,262	(12 ^{2d0})—(05 ^{1d0})	R (26)
128,629	77,743	(12 ^{2d0})—(05 ^{1d0})	R (25)
130,838	76,430	(12 ^{2d0})—(05 ^{1c0})	R (25)
134,932	74,111	(12 ^{2d0})—(05 ^{1c0})	R (24)
201,059	49,737	—	—
211,001	47,393	—	—
222,949	44,853	—	—
284	35,2	(11 ^{1c0})—(11 ^{1c0})	R (11)
309,7140	32,28785	(11 ^{1c0})—(11 ^{1c0})	R (10)
310,8870	32,16603	(11 ^{1c0})—(04 ⁰ 0)	R (10)
335,1831	29,8344	(04 ⁰ 0)—(04 ⁰ 0)	R (9)
336,5578	29,71258	(11 ^{1c0})—(04 ⁰ 0)	R (9)
372,5283	26,84360	(04 ⁰ 0)—(04 ⁰ 0)	R (8)

$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход		$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход	
		колебательный	вращательный			колебательный	вращательный
538,2	18,580	—	—	53,910	185,49	—	—
545,4	18,335	—	—	54,853	182,31	—	—
676	14,79	—	—	55,000	181,82	(020)—(020)	$6_{52}-6_{43}$
773,5	12,928	—	—	55,088	181,53	(020)—(020)	$5_{50}-5_{41}$
(36) DCN-лазер				57,659	173,43	(100)—(020)	$9_{19}-8_{44}$
181,789	55,009	(22 ⁰⁰)—(22 ⁰⁰)	R (22)	57,799	173,01	(020)—(020)	$9_{54}-9_{45}$
189,9490	52,6457	(22 ⁰⁰)—(09 ¹⁰ 0)	R (21)	66,880	149,52	—	—
190,0080	52,6294	(22 ⁰⁰)—(22 ⁰⁰)	R (21)	66,903	149,45	—	—
194,7027	51,3604	(22 ⁰⁰)—(09 ¹⁰ 0)	R (20)	67,169	148,88	(020)—(020)	$4_{41}-4_{32}$
194,7644	51,3441	(09 ¹⁰ 0)—(09 ¹⁰ 0)	R (20)	н.л.			
204,3872	48,9267	(09 ¹⁰ 0)—(09 ¹⁰ 0)	R (19)	68,344	146,32	(100)—(020)	$6_{25}-5_{50}$
(3в) HCN-лазер				72,856	137,26	(020)—(020)	$5_{41}-5_{32}$
110,240	90,711	—	—	73,401	136,24	(100)—(100)	$8_{17}-8_{08}$
113,311	88,253	—	—	78,443	127,481	(100)—(020)	$8_{08}-8_{55}$
138,768	72,063	—	—	79,087	126,44	(020)—(020)	$8_{44}-8_{35}$
165,150	60,551	—	—	85,564	116,87	(100)—(020)	$7_{52}-7_{61}$
(4а) H ₂ O-лазер (рис. 33.36—33.38)				86,478	115,64	(100)—(100)	$9_{54}-9_{45}$
2,279	4387,60	—	—	87,323	114,52	—	—
4,77	2096,0	—	—	87,469	114,32	(100)—(020)	$8_{53}-8_{62}$
7,458	1340,70	(020)—(010)	$4_{41}-5_{50}$	89,772	111,39	(100)—(020)	$9_{54}-9_{63}$
7,596	1316,38	(020)—(010)	$5_{50}-6_{61}$	89,947	111,18	—	—
7,709	1297,19	(020)—(010)	$6_{61}-7_{40}$	90,565	110,42	—	—
11,83	845,3	—	—	115,32	86,72	(020)—(020)	$8_{35}-8_{26}$
11,96	836,1	—	—	118,591	84,323	(001)—(020)	$6_{42}-6_{61}$
16,932	590,60	(010)—(010)	$13_{11,2}-12_{10,3}$	120,08	83,28	(001)—(001)	$6_{42}-6_{33}$
23,13	432,3	(020)—(020)	$9_{63}-8_{54}$	220,230	45,407	(100)—(020)	$5_{23}-5_{50}$
23,365	427,99	(100)—(020)	$9_{45}-8_{54}$	(46) H ₂ ¹⁸ O-лазер			
24,966	400,54	(100)—(020)	$8_{44}-7_{53}$	25,162	397,42	(100)—(020)	$8_{45}-7_{52}$
26,660	375,09	(100)—(020)	$7_{43}-6_{52}$	26,595	376,01	(100)—(020)	$7_{44}-6_{51}$
27,9707	357,516	(001)—(020)	$6_{33}-5_{50}$	28,295	353,42	(100)—(020)	$6_{43}-5_{50}$
28,054	356,46	(020)—(020)	$6_{61}-5_{50}$	33,308	300,23	(020)—(020)	$5_{50}-4_{41}$
28,270	353,73	(100)—(020)	$8_{08}-7_{35}$	35,383	282,62	(100)—(020)	$12_{1,12}-11_{29}$
28,356	352,66	(020)—(020)	$8_{44}-7_{35}$	48,366	206,76	(100)—(020)	$6_{43}-6_{52}$
28,451	351,48	(100)—(020)	$6_{42}-5_{51}$	48,604	205,74	(020)—(020)	$6_{61}-6_{52}$
32,924	303,73	(020)—(020)	$5_{50}-4_{41}$	48,765	205,07	(100)—(020)	$7_{44}-7_{53}$
33,029	302,76	(100)—(020)	$5_{14}-4_{41}$	49,430	202,31	(100)—(020)	$8_{45}-8_{54}$
34,60	289,02	—	—	56,129	178,16	(020)—(020)	$5_{50}-5_{41}$
35,017	285,58	(100)—(100)	$7_{34}-6_{25}$	(4в) D ₂ O-лазер			
35,833	279,07	(100)—(020)	$12_{1,12}-11_{29}$	26,36	279,36	—	—
36,606	273,18	(010)—(010)	$13_{11,2}-13_{10,3}$	33,896	295,02	(100)—(020)	$13_{59}-12_{66}$
37,848	264,21	(100)—(020)	$12_{0,12}-11_{39}$	35,081	285,05	(100)—(020)	$12_{58}-11_{65}$
38,086	262,56	—	—	36,096	277,04	(100)—(020)	$11_{56}-10_{65}$
39,695	251,92	(001)—(020)	$7_{44}-6_{61}$	36,324	275,30	(100)—(020)	$11_{57}-10_{64}$
40,45	247,2	(100)—(020)	$13_{1,13}-12_{2,10}$	36,526	273,78	(020)—(020)	$11_{75}-10_{64}$
40,638	246,08	(020)—(020)	$4_{41}-3_{30}$	37,788	264,63	(100)—(020)	$10_{55}-9_{64}$
42,51	235,24	—	—	37,860	264,13	(100)—(020)	$10_{56}-9_{63}$
45,517	219,70	—	—	39,53	252,97	(100)—(020)	$9_{55}-8_{64}$
45,91	217,82	—	—	40,994	243,94	(020)—(020)	$10_{64}-9_{55}$
47,244	211,67	(020)—(020)	$9_{63}-9_{54}$	41,79	239,28	(100)—(020)	$12_{56}-11_{75}$
47,39	211,01	—	—	48,80	204,92	—	—
47,468	210,67	(001)—(020)	$6_{33}-6_{52}$	50,71	197,20	—	—
47,687	209,70	(020)—(020)	$6_{61}-6_{52}$	54,73	182,72	—	—
48,19	207,5	(100)—(020)	$9_{45}-9_{54}$	56,830	175,96	(100)—(020)	$16_{0,16}-15_{3,13}$
48,676	205,44	—	—	61,182	163,45	—	—
49,06	203,83	(100)—(020)	$7_{43}-7_{52}$	71,944	138,99	(100)—(020)	$11_{57}-11_{66}$

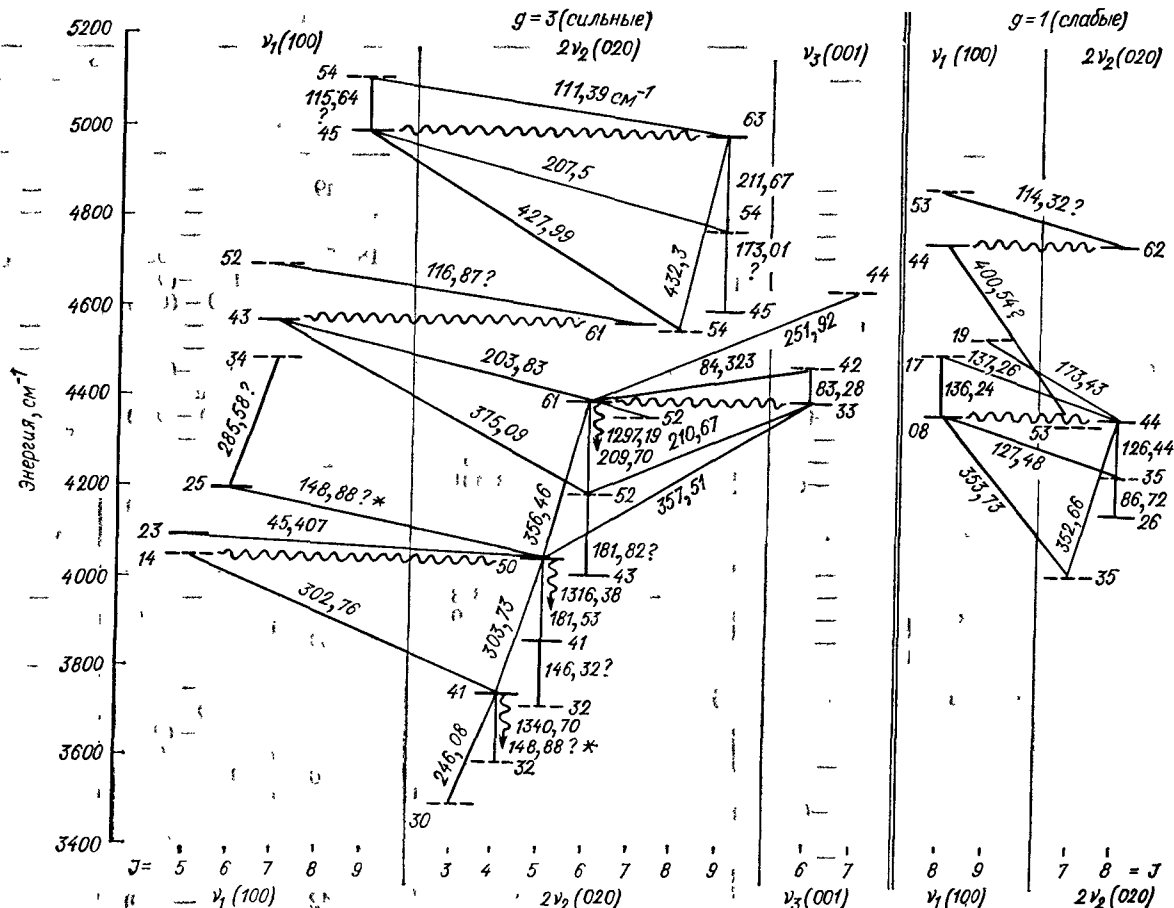


Рис. 33.36. Схема энергетических уровней молекулы H_2^{16}O [5]. (Показана большая часть наблюдавшихся лазерных переходов (длины волн указаны в cm^{-1}). Уровни идентифицированы по квантовым числам K_a , K_c . Уровни классов симметрии ++ и +- изображены сплошными, а классов -+ и -- прерывистыми линиями. Лазерные переходы с сомнительной идентификацией помечены знаком (?), переходы, для которых возможны две идентификации, — знаком (*).

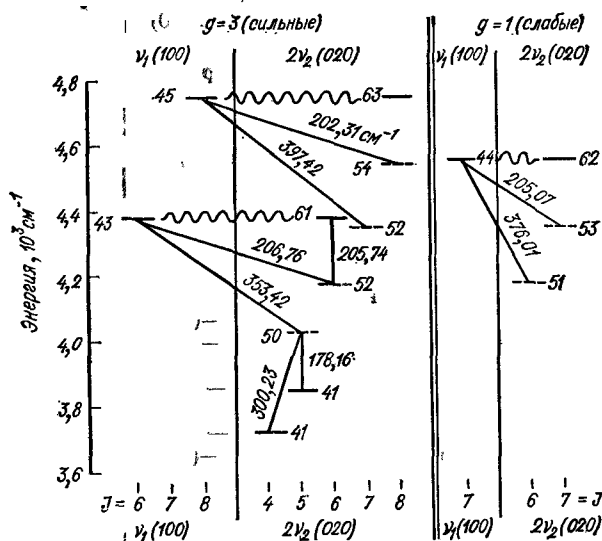


Рис. 33.37. Схема энергетических уровней молекулы H_2^{18}O и соответствующие лазерные переходы [5]. Обозначения см. на рис. 33.36.

$\lambda_{\text{вак}}, \text{мкм}$	$\nu, \text{см}^{-1}$	Переход		$\lambda_{\text{вак}}, \text{мкм}$	$\nu, \text{см}^{-1}$	Переход	
		колебательный	вращательный			колебательный	вращательный
72,427	138,07	(020) — (020)	$10_{74} - 10_{65}$ или $10_{73} - 10_{64}$	99,00	101,01	—	—
				103,33	96,78	—	—
72,757	137,44	(020) — (020)	$11_{75} - 11_{66}$	107,731	92,823	(100) — (020)	$11_{66} - 11_{75}$
73,341	136,35	(100) — (020)	$12_{68} - 12_{67}$	107,91	92,67	(100) — (100)	$13_{68} - 13_{69}$
74,526	134,18	(100) — (020)	$13_{69} - 13_{68}$	108,88	91,84	(100) — (020)	$11_{66} - 11_{74}$
76,305	131,05	—	—	110,49	90,51	(100) — (020)	$12_{66} - 12_{76}$
78,16	127,94	—	—	111,74	89,49	(100) — (020)	$13_{68} - 13_{77}$
83,730	119,43	(020) — (020)	$10_{65} - 10_{66}$	170,08	58,80	(020) — (020)	$11_{47} - 11_{38}$
84,111	118,89	(020) — (020)	$11_{66} - 11_{57}$	171,67	58,25	(100) — (020)	$11_{0,11} - 11_{38}$
84,284	118,65	(100) — (020)	$12_{1,12} - 11_{47}$	218,5	45,77	—	—

$\lambda_{\text{вак}}, \text{мкм}$	$\nu, \text{см}^{-1}$	Относительная интенсивность	$\lambda_{\text{вак}}, \text{мкм}$	$\nu, \text{см}^{-1}$	Переход
------------------------------------	-----------------------	--------------------------------	------------------------------------	-----------------------	---------

(5) H_2S -лазер

33,48	298,7	0,6
33,65	297,2	480
49,63	201,5	1
52,41	190,8	60
56,86	175,9	60
60,31	165,8	200
61,52	162,6	1000
73,54	136,0	0,2
80,52	124,2	220
83,45	119,8	1000
92,03	108,7	0,1
96,41	103,7	3
103,3	96,8	125
108,8	91,9	7
116,8	85,6	4
126,2	79,2	2
129,1	77,4	4
130,8	76,4	1
135,5	73,8	2
140,6	71,1	10
162,4	61,6	560
192,9	51,8	20
225,4	44,4	1000

(6a) N_2O -лазер (рис. 33.39)Полоса $(00^01) - (10^0)$, R-ветвь

10,3456	966,59	R (35)
10,3532	965,88	R (34)
10,3609	965,16	R (33)
10,3687	964,44	R (32)
10,3765	963,72	R (31)
10,3843	962,99	R (30)
10,3922	962,26	R (29)
10,4001	961,53	R (28)
10,4081	960,79	R (27)
10,4161	960,05	R (26)
10,4242	959,31	R (25)
10,4323	958,56	R (24)
10,4405	957,81	R (23)
10,4487	957,06	R (22)

10,4570	956,30	R (21)
10,4653	955,54	R (20)
10,4737	954,77	R (19)
10,4821	954,01	R (18)
10,4906	953,24	R (17)
10,4991	952,46	R (16)
10,5077	951,69	R (15)
10,5163	950,90	R (14)
10,5250	950,12	R (13)
10,5337	949,33	R (12)
10,5425	948,54	R (11)
10,5513	947,75	R (10)
10,5602	946,95	R (9)
10,5692	946,15	R (8)
10,5781	945,35	R (7)
10,5872	944,54	R (6)
10,5963	943,73	R (5)
10,6054	942,91	R (4)
10,6146	942,09	R (3)
10,6239	941,27	R (2)
10,6332	940,45	R (1)
10,6426	939,62	R (0)

(6b) Полоса $(00^01) - (10^0)$, P-ветвь

10,6614	937,96	P (1)
10,6710	937,11	P (2)
10,6806	936,28	P (3)
10,6903	935,43	P (4)
10,6999	934,58	P (5)
10,7097	933,73	P (6)
10,7195	932,88	P (7)
10,7294	932,02	P (8)
10,7393	931,16	P (9)
10,7493	930,29	P (10)
10,7593	929,43	P (11)
10,7694	928,55	P (12)
10,7796	927,68	P (13)
10,7898	926,80	P (14)
10,8000	925,92	P (15)
10,8104	925,03	P (16)
10,8208	924,15	P (17)
10,8312	923,25	P (18)
10,8418	922,36	P (19)
10,8523	921,46	P (20)

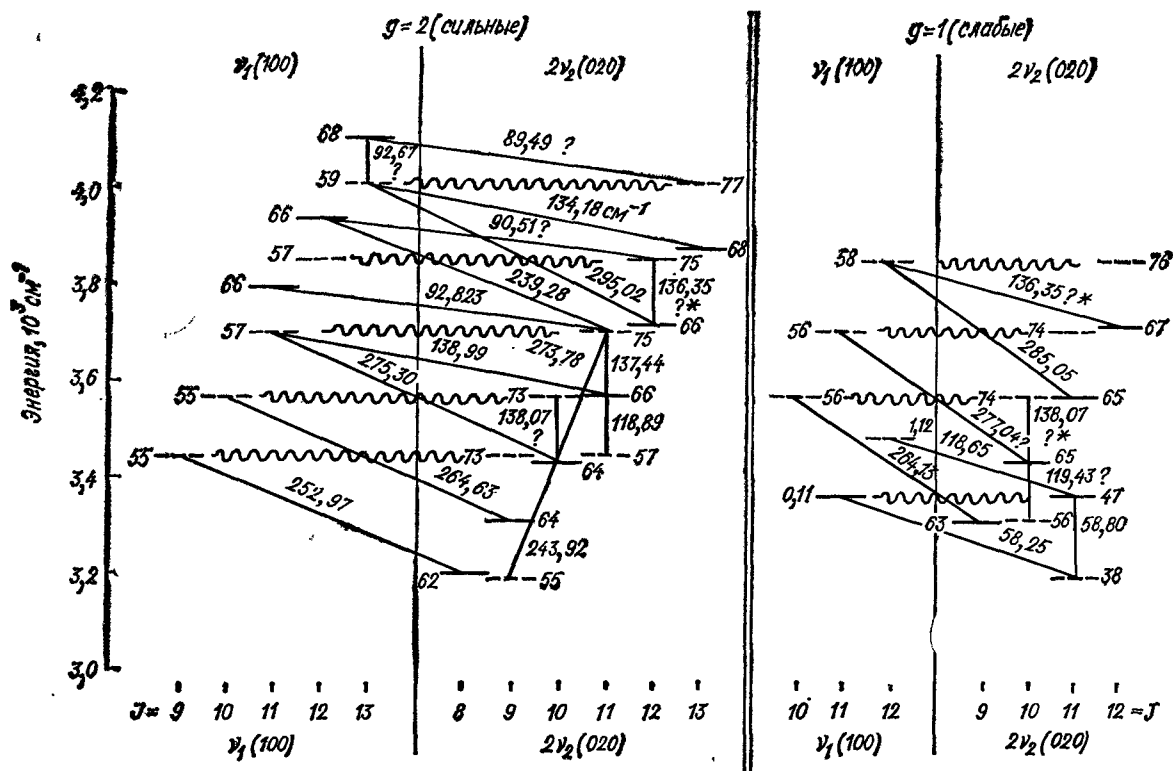


Рис. 33.38. Схема энергетических уровней молекулы $D_2^{16}O$ и соответствующие лазерные переходы [5]. Обозначения см. на рис. 33.36.

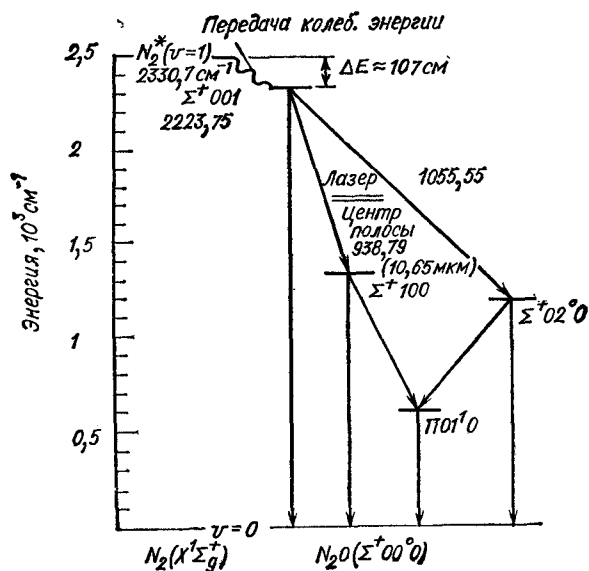


Рис. 33.39. Схема энергетических уровней молекул N_2 и N_2O [5]. Показан процесс передачи колебательной энергии от N_2 к N_2O с последующим лазерным переходом в полосу $(00^1) - (10^0)$ N_2O . ($X^1 \Sigma_g^+$, $v=0$) и ($\Sigma^+ 00^0$) — основные состояния соответственно N_2 и N_2O .

$\lambda_{\text{вак}}, \text{мкм}$	$\nu, \text{см}^{-1}$	Переход	$\lambda_{\text{вак}}, \text{мкм}$	$\nu, \text{см}^{-1}$	Переход
10,8629	920,56	P (21)	8,3654	1195,40	P (19)
10,8736	919,65	P (22)	8,3685	1194,98	P (20)
10,8844	918,75	P (23)	8,3715	1194,52	P (21)
10,8952	917,83	P (24)	8,3746	1194,09	P (22)
10,9061	916,92	P (25)	8,3779	1193,62	P (23)
10,9170	916,00	P (26)	8,3809	1193,19	P (24)
10,9280	915,08	P (27)	8,3839	1192,76	P (25)
10,9390	914,16	P (28)	8,3870	1192,32	P (26)
10,9501	913,23	P (29)	8,3900	1191,89	P (27)
10,9613	912,29	P (30)	8,3930	1191,46	P (28)
10,9726	911,36	P (31)	8,3962	1191,02	P (29)
10,9839	910,42	P (32)	8,3999	1190,49	P (30)
10,9953	909,48	P (33)	8,4024	1190,14	P (31)
11,0067	908,53	P (34)	8,4055	1189,70	P (32)
11,0182	907,58	P (35)	8,4085	1189,27	P (33)
11,0298	906,63	P (36)	8,4117	1188,82	P (34)
11,0415	905,68	P (37)	8,4146	1188,40	P (35)
(7a) OCS-лазер			8,4178	1187,95	P (36)
Полоса (00 ⁰ 1) — (10 ⁰ 0)			8,4213	1187,46	P (37)
			8,4243	1187,04	P (38)
8,2388	1213,76	R (26)	(7b) Разные переходы		
8,2416	1213,35	R (25)	123	81,3	?
8,2439	1213,02	R (24)	132	75,8	?
8,2518	1211,86	R (21)	(8) SO ₂ -лазер		
8,2543	1211,48	R (20)	140,85	70,99	?
8,2571	1211,08	R (19)	151,16	66,16	?
8,2595	1210,73	R (18)	192,67	51,90	?
8,2623	1210,32	R (17)	215,27	46,45	?
8,2645	1209,99	R (16)			
8,2673	1209,59	R (15)			
8,3625	1195,82	P (18)			

Таблица 33.6

Лазерные переходы в некоторых многоатомных молекулярных газах [5]

$\lambda_{\text{вак}}, \text{мкм}$	$\nu, \text{см}^{-1}$	Переход	$\lambda_{\text{вак}}, \text{мкм}$	$\nu, \text{см}^{-1}$	Переход
(1) CH ₃ F-лазер, чисто вращательные переходы			223,5	44,74	—
			237,6	42,09	—
			253,6	39,43	—
451,924	22,1276	$\nu = 0$ R (12), K = 2	254,1	39,35	—
451,903	22,1286	R (12), K = 1	263,7	37,92	—
			264,6	37,79	—
496,105	20,1570	$\nu = 1$ R (10), K = 2	278,8	35,87	—
496,072	20,1584	R (10), K = 1	292,2	34,22	—
541,147	18,4793	R (11), K = 2	292,5	34,19	—
541,113	18,4804	R (11), K = 1	369,1	27,09	—
			392,3	25,49	—
			417,8	23,93	—
(2) CH ₃ OH-лазер, чисто вращательные переходы			570,5	17,53	—
			699,5	14,30	—
70,6	141,6	—	(3) NH ₃ -лазер		
118,8	84,18	—	Полоса (03 ^s 0) — (02 ^a 0)		
164,3	60,86	—	14,78	676,6	—
170,6	58,62	—	15,04	664,9	—
185,5	53,91	—	15,08	663,1	—
190,8	52,41	—	15,41	648,9	—
193,2	51,76	—	15,47	646,4	—
198,8	50,30	—			
202,4	49,41	—			

$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход	$\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$	Переход
18,21	549,1	—	31,47	317,7	—
21,471	465,74	$P(2) 1_0$	31,951	312,97	—
22,542	443,61	$P(3) 2_2$	32,13	311,2	—
22,563	443,20	$P(3) 2_1$	(4) $\text{H}_2\text{C}=\text{CHCl}$ -лазер, чисто вращательные переходы		
22,71	440,3	—			
23,675	422,38	$P(4) 3_0$ или 3_1			
23,86	419,11	—			
24,918	401,32	$P(5) 4_1$	386,0	25,91	—
25,12	398,09	—	507,7	19,70	—
26,282	380,49	$P(6) 5_0 5_1$	634,4	15,76	—
30,69	325,8	—			

33.4. ЛАЗЕРЫ НА ПРИМЕСНЫХ КРИСТАЛЛАХ

Лазеры на примесных кристаллах представляют собой системы, в которых в качестве активного вещества используются кристаллические материалы. Генерация и усиление осуществляются в этих системах в результате переходов возбужденных ионов-активаторов, введенных в решетку кристалла, в устойчивое состояние. Возбуждение (накачка) ионов элемента-активатора производится оптически, чаще всего с помощью импульс-

ных или непрерывно действующих газоразрядных ламп.

Энергетические уровни ионов, вводимых в кристаллическую решетку в качестве активаторов, значительно отличаются от уровней энергии свободных ионов. Под действием поля кристаллической решетки происходит расщепление, смещение и уширение уровней ионов. На рис. 33.40 показаны энергетические уровни двухвалентных ионов редкоземельных элементов, актиноидов и элементов группы железа, а на рис. 33.42 и 33.43 уровни трехвалентных ионов редкоземельных элементов. Наи-

Кристаллические вещества

Вещество	Симметрия	Пространственная группа, структура	Симметрия расположения замещаемого иона	Постоянные решетки, Å	$\rho, \text{ г/см}^3$
Оксиды					
Al_2O_3	Ромбоэдриальная	$D_{3d}^5 - \bar{R}3c$, корунд	$C_{3v}(\text{Al}^{3+})$	$a_0 = 4,759$ $c_0 = 12,989$	3,987
Er_2O_3	Кубическая	$T_h^7 - Ia3$, биксбайт	$C_2(\text{Er}^{3+})$ $C_{3i}(\text{Er}^{3+})$	10,547	8,64
Gd_2O_3	Моноклинная	$C_{2h}^3 - C2/m$	$C_s(\text{Gd}^{3+})$	$a_0 = 14,061$ $b_0 = 3,566$ $c_0 = 8,760$	7,407
La_2O_3	Гексагональная	$D_{3d}^3 - \bar{C}3m$	$C_{3v}(\text{La}^{3+})$	$a_0 = 3,937$ $c_0 = 6,130$	6,51
Y_2O_3	Кубическая	$T_h^7 - Ia3$, биксбайт	$C_2(\text{Y}^{3+})$ $C_{3i}(\text{Y}^{3+})$	10,604	5,06
$\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$	Гексагональная	$D_{3d}^3 - \bar{P}3m$	$C_{3v}(\text{La}^{3+})$	$a_0 = 4,051$ $c_0 = 6,943$	5,73
$\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$	Кубическая	$O_h^{10} - Ia3d$, гранат	$D_2(\text{Gd}^{3+})$ $C_{3i}(\text{Ga}^{3+})$	12,376	—
$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}(\text{YAG})$	»	$O_h^{10} - Ia3d$, »	$D_2(\text{Y}^{3+})$ $C_{3i}(\text{Al}^{3+})$	12,01	4,55
$\text{Y}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$	»	$O_h^{10} - Ia3d$, »	$D_2(\text{Y}^{3+})$ $C_{3i}(\text{Gd}^{3+})$	12,277	—
YAlO_3	Орторомбическая	$D_{2h}^{16} - Pbnm$, искаженный перовскит	$C_{1h}(\text{Y}^{3+})$ $C_i(\text{Al}^{3+})$	$a_0 = 5,179$ $b_0 = 5,329$ $c_0 = 7,370$	5,35
Фториды					
BaF_2	Кубическая	$O_h^5 - Fm3m$, флюорит	—	6,19	4,83
CaF_2	»	$O_h^5 - Fm3m$, »	$O_h(\text{Ca}^{2+})$ $C_{4v}(\text{Ca}^{2+} + \text{F}^-)$ $C_{3v}(\text{Ca}^{2+} + \text{O}^{2-})$	5,464	3,179
SrF_2	»	$O_h^5 - Fm3m$, »	—	5,78	4,24
MgF_2	Тетрагональная	$D_{4h}^{14} - P4/mnm$, рутил	$D_{2h}(\text{Mg}^{2+})$	$a_0 = 4,621$ $c_0 = 3,053$	3,177

большее воздействие испытывают уровни, соответствующие внешним электронам ионов, так как внутренние электроны атома экранируются внешними оболочками.

Как правило, кристаллы до введения в них ионов-активаторов являются совершенно бесцветными и оптически прозрачными. Введение в них ионов активатора приводит к появлению областей селективного поглощения и спонтанной люминесценции (центров окраски). Основные характеристики кристаллических материалов, используемых в качестве матриц для различных ионов-активаторов приведены в табл. 33.7.

Одни и те же ионы-активаторы в зависимости от типа кристалла, в который они введены, образуют различные лазерные системы, характеризующиеся и различными генерационными параметрами. Большое влияние при этом оказывает температура активной среды, в зависимости от которой меняются радиационные параметры и спектр поглощения ионов элемента-активатора в кристалле. Одним из возможных методов вариации свойств лазерных кристаллов является концентрация ионов-активаторов.

Основные лазерные системы на кристаллах, активированных различными ионами, режимы их работы, источники накачки и другие параметры приведены в табл. 33.8.

В ряде случаев кроме ионов-активаторов в кристаллы вводятся также другие ионы, роль которых в системе сводится к поглощению энергии накачки и передаче ее лазерному иону. Тем самым повышается эффектив-

ность лазера. Этот метод повышения эффективности преобразования энергии накачки в лазерное излучение носит название метода сенсibiliзирующей добавки. Механизм сенсibiliзации пояснен на рис. 33.44. Ионы-сенсibiliзаторы для различных кристаллов и лазерных ионов перечислены в табл. 33.9.

В таблицах данного раздела приняты обозначения:

- ρ — плотность, $г/см^3$;
- $T_{пл}$ — температура плавления, $^{\circ}C$;
- H — твердость по Кнупу, $кг \cdot мм^{-2}$; значение твердости (по Моосу) помечено знаком (М);
- k — коэффициент теплопроводности, $вт/(см \cdot град)$;
- α — коэффициент теплового расширения, $10^{-6} \cdot град^{-1}$;
- n — показатель преломления;
- λ — длина волны лазерного излучения, $мкм$;
- E_l — энергия нижнего лазерного уровня, $см^{-1}$;
- C — массовая концентрация ионов активатора, %;
- τ_F — время жизни верхнего лазерного уровня, $мсек$;
- $\delta\nu_F$ — ширина линии люминесценции, $см^{-1}$;
- T — рабочая температура, $^{\circ}K$.

Режим работы: имп. — импульсный; непр. — непрерывный.

Накачка: Хе — ксеноновая, W — вольфрамовая, Hg — ртутная или Кг — криптоновая лампы.

П р и м е ч а н и е. Характеристики кристаллов для лазеров могут слегка варьироваться в зависимости от приготовления и от образца к образцу.

для лазеров [6]

Т а б л и ц а 33.7

$T_{пл}, ^{\circ}C$	$H, кг/мм^2$	$k, вт/(см \cdot град)$	$\alpha, 10^{-6} град^{-1}$	Область прозрачности, $мкм$	n	Метод роста
2040	2100	0,35 $\parallel$ с-оси 0,33 $\perp$ с-оси	5,31 $\parallel$ с-оси 4,78 $\perp$ с-оси	0,14—6,5	1,763 (n_0) 1,755 (n_c)	Чохральского — Вернейля
2660	—	—	—	—	—	»
2350	—	—	9,05	—	2,1	»
2307	—	—	—	—	—	»
2410	—	0,27	7	0,23—8	1,91	»
2070	780	0,05	6 $\parallel$ с-оси 3 $\perp$ с-оси	0,35—8	2,2	Бриджмена—Сток-бергера
~1825	—	0,09	—	—	—	Чохральского
1970	1380	0,13	6,9	0,3—5,5	1,823	»
—	—	0,09	—	—	1,93	»
1875	1325	0,11	9,5 $\parallel$ а-оси 4,3 $\parallel$ б-оси 10,8 $\parallel$ с-оси	0,3—5,8	1,97 (n_a) 1,96 (n_b) 1,94 (n_c)	»
1280	82	—	18,4	0,23—12	1,473	Бриджмена—Сток-бергера
1360	163	0,097	19,5	0,13—12	1,433	»
1400	4 (М)	—	—	—	1,438	—
1255	—	0,031	8,8 $\parallel$ с-оси 13,1 $\perp$ с-оси	до 6	1,38	Зонная плавка

Вещество	Симметрия	Пространственная группа, структура	Симметрия расположения замещаемого нона	Постоянные решетки, Å	ρ , г/см ³
MnF ₂	Тетрагональная	$D_{4h}^{14} - P4/mnm$, »	D_{2h} (Mn ²⁺)	$a_0 = 4,715$ $c_0 = 3,131$	—
ZnF ₂	»	$D_{4h}^{14} - P4/mnm$, »	D_{2h} (Zn ²⁺)	$a_0 = 4,703$ $c_0 = 3,134$	4,84
CeF ₃	»	$D_{6h}^3 - C6/mcm$, тизонит	C_2 (Ce ³⁺)	$a_0 = 4,115$ $c_0 = 7,288$	6,16
HoF ₃	Орторомбическая	$Pnma$	C_s (Ho ³⁺)	—	—
LaF ₃	Гексагональная	$D_{6h}^3 - C6/mcm$, тизонит	C_2 (La ³⁺)	$a_0 = 4,148$ $c_0 = 7,354$	5,94
LiYF ₄ (YLF)	Тетрагональная	$C_{4h}^6 - I4_1/a$, шеелит	— S_4 (Y ³⁺)	$a_0 = 5,26$ $c_0 = 10,94$	—
Вольфраматы					
CaWO ₄	»	$C_{4h}^6 - I4_1/a$, »	S_4 (Ca ²⁺)	$a_0 = 5,242$ $c_0 = 11,372$	6,120
SrWO ₄	»	$C_{4h}^6 - I4_1/a$, »	S_4 (Sr ²⁺)	$a_0 = 5,40$ $c_0 = 11,90$	6,18
NaGd (WO ₄) ₂	»	$C_{4h}^6 - I4_1/a$, »	S_4 (Gd ³⁺)	—	—
NaLa (WO ₄) ₂	»	$C_{4h}^6 - I4_1/a$, »	S_4 (La ³⁺)	$a_0 = 5,357$ $c_0 = 11,743$	—
Молибдаты					
CaMoO ₄	»	$C_{4h}^6 - I4_1/a$, »	S_4 (Ca ²⁺)	$a_0 = 5,226$ $c_0 = 11,43$	4,256
LaNa (MoO ₄) ₂	Тетрагональная	$C_{4h}^6 - I4_1/a$, шеелит	S_4 (La ³⁺)	$a_0 = 5,328$ $c_0 = 11,699$	4,79
PbMoO ₄	»	$C_{4h}^6 - I4_1/a$, »	(Pb ²⁺)	$a_0 = 5,435$ $c_0 = 12,110$	6,816
SrMoO ₄	»	$C_{4h}^6 - I4_1/a$, »	S_4 (Sr ²⁺)	$a_0 = 5,38$ $c_0 = 11,97$	4,15
Gd ₂ (MoO ₄) ₃	Орторомбическая	$Pba2$, —	(Gd ³⁺)	$a_0 = 10,3858$ $b_0 = 10,4186$ $c_0 = 10,7004$	—
KY (MoO ₄) ₃	»	$D_{2h}^{14} - Pbn$, —	S_4 (Y ³⁺)	$a_0 = 5,07$ $b_0 = 18,23$ $c_0 = 7,95$	—
Ниобаты					
Ca (NbO ₃) ₂	»	$D_{2h}^{14} - Pbcn$, ферсмит	C_2 (Ca ²⁺)	—	4,72
LiNbO ₃	Ромбоэдральная	$C_{3v}^6 - R3c$, ильменит	—	$a_0 = 5,47$ $b_0 = 5,112$ $c_0 = 13,816$	4,628
LaNbO ₄	Моноклинная	C_2 , — фергюсонит	(La ³⁺)	$a_0 = 5,56$ $b_0 = 11,54$ $c_0 = 5,20$	—
Ванадаты					
Ca ₃ (VO ₄) ₂	»	$C_{2h}^6 - C2/c$, —	(Ca ²⁺)	$a_0 = 8,35$ $b_0 = 10,77$ $c_0 = 7,00$	3,55
YVO ₄	Тетрагональная	$P_{4h}^{19} - I4_1/2md$, циркон	D_{2d} (Y ³⁺)	$a_0 = 7,133$ $c_0 = 6,291$	4,23
Фосфаты, силикаты, германаты					
Ca ₅ (PO ₄) ₃ F, (FAP)	Гексагональная	$C_{6h}^2 - P6_3/m$, апатит	C_{1h} (Ca ²⁺ —I) C_3 (Ca ²⁺ —II)	$a_0 = 9,368$ $c_0 = 6,884$	3,189
CaY ₄ (SiO ₄) ₃ O, (SOAP)	»	$C_{6h}^2 - P6_3/m$, »	—	—	—
Ba ₂ MgG ₂ O ₇ , (BMAG)	Тетрагональная	$P_{2d}^3 - P4_2/m$, акерманит	(Ba ²⁺)	$a_0 = 7,84$ $c_0 = 5,01$	—

$T_{пл}, ^\circ C$	$H, \text{кг/мм}^2$	$k, \text{вт/(см} \cdot \text{град)}$	$\alpha, 10^{-6} \text{ град}^{-1}$	Область прозрачности, мкм	n	Метод роста
930	—	—	—	—	—	Зонная плавка
872	—	—	—	—	—	»
1325— 1425	4,5 (M)	—	—	0,3—9,5	1,62	Бриджмена — Сток- бергера
1100	743	—	—	—	1,58	Чохральского
1490	4,5 (M)	0,051	—	—	1,6	»
—	—	—	9,1 $\parallel$ с-оси 8,5 $\perp$ с-оси	—	1,634 (n_0) 1,631 (n_e)	»
1570	4,5 (M)	0,33 $\parallel$ с-оси	11,2 $\parallel$ а-оси 18,7 $\parallel$ с-оси	0,3—3,0	1,92	»
1566	—	—	—	—	—	»
1400	—	—	—	—	—	»
—	—	—	—	—	—	»
1430	4,3 (M)	0,04	25,5 $\parallel$ с-оси 19,4 $\parallel$ а-оси	—	1,97	»
—	4,5 (M)	0,022	—	—	—	»
1070	—	—	—	—	—	»
1490	—	0,040 $\parallel$ а-оси 0,041 $\parallel$ с-оси	—	—	1,94	»
—	—	—	—	—	—	»
—	—	—	—	0,33—5,5	—	»
1560	5,5 (M)	—	—	0,3—5,5	2,07 (α) 2,10 (β) 2,18 (γ)	»
1253	5 (M)	0,056	—	0,37—5	2,286 (n_0) 2,200 (n_e)	»
1650	—	—	—	0,3—6	2,187 (n_g) 2,094 (n_m) 2,077 (n_p)	»
1470	4,3 (M)	0,014	55 $\parallel$ с-оси 35 $\parallel$ а-оси	—	1,89	»
1750— 1900	5,5 (M)	0,052 $\parallel$ с-оси 0,051 $\perp$ с-оси	7,3 $\perp$ с-оси	0,45—4,8	1,86 (n_0) 1,88 (n_c)	Бриджмена — Сток- бергера
1705	540	0,021 [0001] 0,019 [1010]	10 [0001] 9,4 [1010]	—	1,63	Чохральского
>2000	—	—	—	—	1,8	»
—	—	—	—	—	—	—

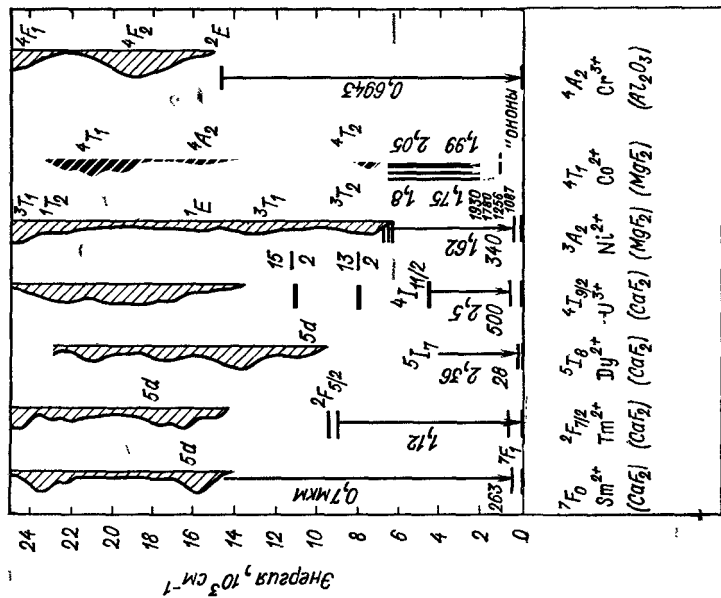


Рис. 33.40. Схемы энергетических уровней ионов двухвалентных редкоземельных элементов, ионов, актиноидов и ионов группы железа в матрицах некоторых кристаллов [6].

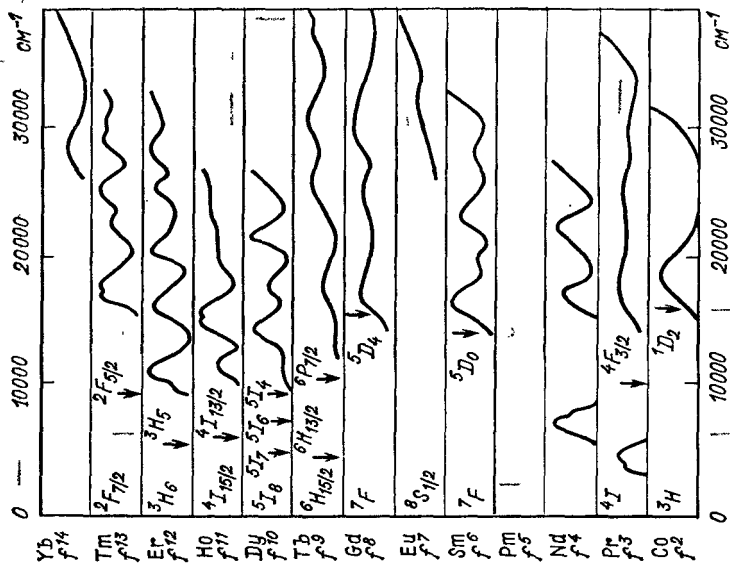


Рис. 33.41. Спектры поглощения ионов двухвалентных редкоземельных элементов в кристалле CaF_2 [6]. Полюжение переходов $f \rightarrow f$ указано стрелкой.

Ионы	Кристалл	Лазерный переход	λ , мкм	E_L , см ⁻¹	C, %	τ_F , мсек	$\delta\nu_F$, см ⁻¹	Режим работы	T, °K	Накачка	
Группа железа Хром Cr ³⁺ , 3d ³	Al ₂ O ₃	$^2E(\bar{E}) \rightarrow ^4A_2$	0,6943(R ₁)	0	0,05	3	~10	имп.	300	Хе	
			0,6934	0	0,05	4,3	—	непр.	300	Hg	
		$^2E(2\bar{A}) \rightarrow ^4A_2$ $^2E(\bar{E}) \rightarrow ^4A_2$	0,6929(R ₂)	0	0,05	—	—	имп.	77	Хе	
			0,6934089	0	0,05	—	—	»	77	Hg	
			0,6934255	—	0,05	—	—	»	290	Хе	
	(52Cr ³⁺) (52Cr ³⁺) (50Cr ³⁺)			0,6934382	—	—	—	—	»	≈70	Хе
				0,7009(N ²)	~100	0,5—0,7	1,1	~2	»	≈70	Хе
				0,7041(N ₁)	—	—	1,3	~2	»	≈70	Хе
				1,1213	1150	—	2,3	—	»	77	Хе
				—	—	—	—	—	»	77	Хе
Ванадий V ²⁺ , 3d ³ Кобальт Co ²⁺ , 3d ⁷	MgF ₂	$^4T_2 \rightarrow ^4A_2$	1,821	1420	—	3,1	—	имп.	77	Хе	
			1,750	1087	1	1,3	—	»	77	Хе	
			1,8035	1256	—	—	—	»	77	Хе	
			1,99	1780	—	—	—	»	77	Хе	
			2,05	1930	—	—	—	»	77	Хе	
	ZnF ₂ MgF ₂	$^4T_2 \rightarrow ^4T_1$ $^3T_2 \rightarrow ^3A_2$	2,165	1895	1	0,4	—	»	77	Хе	
			1,623	340	1,5	11,5	—	»	77	Хе	
			1,636	350	—	—	—	»	77	Хе	
			1,674—1,676	526—533	—	—	—	»	77—82	Хе	
			—	—	—	—	—	»	82—100	Хе	
Никель Ni ²⁺ , 3d ⁸	MgO MnF ₂	$^3T_2 \rightarrow ^3A_2$ $^3T_2 \rightarrow ^3A_2$	1,731—1,756	723—805	—	—	—	непр.	85	W	
			1,785—1,797	898—935	—	—	—	имп.	100—192	Хе	
			1,3144	398	—	—	—	непр.	85	W	
			1,915	580	—	11,1	—	имп.	198—240	Хе	
			1,865	560	—	—	—	»	77	Хе	
			1,922	600	—	11,1	—	»	20	Хе	
			1,929	620	—	—	—	»	77	Хе	
			—	—	—	—	—	»	85	Хе	
			1,939	650	—	—	—	непр.	85	W	
			—	—	—	—	—	имп.	85	Хе	
Двухвалентные ионы редкоземельных элементов	CaF ₂	$5d \rightarrow ^7F_1$	0,7085	263	~0,01	0,002	1,6	имп.	20	Хе	
			0,708	—	—	—	—	»	65—90	Излучение рубинового лазера	
			0,720	—	—	—	—	»	>65		
			0,729	—	—	—	—	»	>65		
			SrF ₂ CaF ₂	$^5D_0 \rightarrow ^7F_1$ $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$	0,6969	~270	0,1	14	~1		»
	2,36	90			0,03	12	—	»	77	Hg	
	—	90			0,02	—	—	непр.	77	Хе	
	—	28,8			—	—	—	»	4,2	W	
	—	—			0,05	10	—	»	27	Излучение Солнца	

[illegible]

Ионы	Кристалл	Лазерный переход	λ , мкм	E_l , см ⁻¹	C, %	τ_F , мсек	$\delta\tau_F$, см ⁻¹	Режим работы	T, °К	Накачка
Ca ₃ (PO ₄) ₂ F Ca ₃ (VO ₄) ₂ CaWO ₄		$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	1,0615	1949	2,0	0,125	~7,5	непр.	300	Xe
			1,0612	1952	—	—	~4,5	»	77	Xe
			1,0629	1904	1,1	0,24	~5,3	имп.	300	Xe
								непр.	300	W
								имп.	300	Xe
			1,067	~2000	2,0	0,15	160	»	300	Xe
			1,0584	2016	3,0	0,172	—	непр.	300	Xe
								имп.	300	Xe
			1,065	2016	0,14	0,13	5,3	непр.	77	Xe
								имп.	85	Hg
			1,0652	—	—	—	15	непр.	295	Xe
			1,0633	—	—	—	—	имп.	77	Xe
			1,066	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,0576	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,0582	—	—	—	—	»	77	Xe
			0,9145	471	—	—	—	непр.	295	Hg
								имп.	77	Xe
			$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$					»	77	Xe
			$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$					»	77	Xe
			1,3372	3928	—	—	—	»	77	Xe
CdF ₂ -YF ₃ CeF ₃		$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	1,345	3971	—	—	—	»	77	Xe
			1,387	4196	—	—	—	»	77	Xe
			1,3392	4004	—	—	—	»	295	Xe
			1,0651	~2000	~2	0,31	270	»	300	Xe
			1,0638	2222	0,1	0,225	~9	»	90	Xe
			1,0639	—	4—5	0,27	33	»	300	Xe
			1,0410	—	—	—	20	»	77	Xe
			1,0404	—	—	—	24	»	300	Xe
								»	77	Xe
								»	300	Xe
Gd ₃ Ga ₅ O ₁₂ Gd ₂ (MoO ₄) ₃ Gd ₂ O ₃		$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	1,0633	~2000	3,0	0,2	8,0	»	300	Xe
			~1,06	~2000	3	—	—	»	135	Xe
								»	298	Xe
			1,0789	~2000	—	0,12	20—30	»	300	Xe
			1,0741	—	—	—	—	»	300	Xe
			1,0789	—	—	—	8	»	77	Xe
			1,0776	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,0669	1983	2,5	0,13	12	»	300	Xe
			1,0407	1983	1,0	0,67	~2,3	»	300	Xe
			1,0633	2189	—	—	~6	»	300	Xe
KY(MoO ₄) ₂ LaF ₃		$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	1,0403	1979	—	—	~1	»	77	Xe
			1,0407	—	2,0	0,3	—	»	300	Xe
								непр.	300	Xe
			1,0633	—	—	—	—	непр.	400—500	Xe
			1,0486	~2000	2	0,26	~9	имп.	300	Xe
			1,0635	—	—	—	~6	»	300	Xe
			1,0597	1953	1—2	0,15	—	»	300	Xe
			1,0653	1989	5—10	~0,1	5	»	300	Xe
			1,0595	—	1	0,19	—	»	300	Xe
			1,0624	~2000	1	0,12	9	»	300	Xe
La ₂ O ₃ La ₂ O ₂ S		$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	1,079	~2000	1,0	0,125	11	»	77	Xe
			1,075	1909	1,0	0,090	—	»	300	Xe

Ионы	Кристалл	Лазерный переход	λ , мкм	E_p , см ⁻¹	C, %	τ_F , мсек	$\delta\nu_F$, см ⁻¹	Режим работы	T, °K	Накачка
Неодим Nd ³⁺ , 4f ³	LiNbO ₃	$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	1,0842	2033	—	85	—	нмп	295	Xe
			1,0846	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,0846	—	—	—	17	»	300	Xe
	LiYF ₄	$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	1,0530	2042	2,2	0,42	12,5	»	300	Xe
			1,0471	2042	—	—	—	»	300	Xe
			1,0653	—	1,0	0,44	—	»	300	Xe
	α -NaCaCeF ₆	$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	1,0538	—	0,5	0,36	—	»	300	Xe
	α -NaCaYF ₆	$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	1,0631	—	—	—	—	»	300	Xe
	5NaF·9YF ₃	$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	1,0506	~2000	~1	0,96	—	»	300	Xe
			1,0595	—	—	—	—	»	300	Xe
			1,06	~2000	2	0,18	—	»	77	Xe
	Na _{0,5} Gd _{0,5} WO ₄	$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	1,0586	~2000	—	0,13—0,14	—	»	295	Xe
	PbMoO ₄	$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	1,037	2000	—	1,1—1,2	—	»	295	Xe
	SrF ₂	$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	1,0437	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,044	—	0,2	1,6	—	»	77	Xe
			1,0567	—	2,0	0,36	~24	нмп.	300	Xe
	SrF ₂ ·YF ₃ (10%)	$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	1,0643	~2000	—	—	15	»	295	Xe
			1,0576	—	—	—	—	»	295	Xe
			1,0640	—	—	—	3	»	77	Xe
	SrMoO ₄	$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	1,0652	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,059	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,0627	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,0611	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,0795	2157	3	0,065	12	»	300	Xe
			1,0725	2097	1,5	~0,10	—	непр.	300	—
			1,0645	2023	0,9	0,16	—	нмп.	300	Xe
	(0,3%Cr ³⁺)	$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	1,0612	2001	3,0	~0,2	1,0—1,5	непр.	295	Kr
			1,0642	2110	—	—	6,5	нмп.	77	Xe
			1,0519	—	—	—	—	»	300	Xe
	Y ₃ Al ₅ O ₁₂	$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	1,0613	—	—	—	—	непр.	300	Hg
			1,0640	—	—	—	—	»	300	W
			1,0736	—	—	—	—	»	300	W
			1,1119	—	—	—	—	»	300	W
			1,1158	—	—	—	—	»	300	W
			1,1225	—	—	—	—	»	300	W
			1,319	~4000	—	—	—	»	300	W
			1,318	—	—	0,29	—	нмп.	300	Xe
			1,338	—	—	—	—	»	300	Xe
			1,358	—	—	—	—	»	300	Xe
			0,946	848	1,0	—	—	»	230—295	Xe
			1,0641	2110	1,3	—	—	»	300	Xe
			—	—	—	—	—	непр.	300	Hg
			—	—	—	—	—	»	300	W
	+1,0% Cr ³⁺	$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	—	—	—	—	—	»	300	—

Ионы	Кристалл	Лазерный переход	λ , мкм	E_I , см ⁻¹	C , %	τ_F , мсек	$\delta\nu_F$, см ⁻¹	Режим работы	T , °К	Накачка
Европий Eu^{3+} , $4f^6$ Гольмий Ho^{3+} , $4f^{10}$			1,0612	2001	—	0,24—3,5		непр.	77	Hg
								»	77	W
	$\text{Y}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$	$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	1,0633	~2000	3,0	0,2	6,5	имп.	300	Xe
	Y_2O_3	$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	1,073	~2000	1,0	0,26	3,0	»	77	Xe
			1,078	—	—	—	—	»	77	Xe
	YVO_4	$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	1,069	~2000	0,1	0,033	—	»	~90	Xe
			1,0641	1964	~2	~0,09	—	»	300	Xe
			1,0664	1985	—	—	—	»	300	Xe
	Y_2O_3	$^5D_0 \rightarrow ^7F_2$	0,6113	859	5,0	0,87	—	»	220	Xe
	YVO_4	$^5D_0 \rightarrow ^7F_2$	0,6193	~1000	—	—	—	»	90	Xe
	CaF_2	$^5I_7 \rightarrow ^5I_8$	2,092	~230	—	—	—	»	77	Xe
		$^5S_2 \rightarrow ^5I_8$	0,55122	270	0,4—0,8	0,7	~6	»	77	Xe
	3% ErF_3 , 3% YbF_3 , 3% TmF_3	$^5I_7 \rightarrow ^5I_8$	2,1	—	1	6	—	имп.	77	Xe
								непр.	77	Xe
	$\text{CaF}_2\text{-ErF}_3$	$^5I_7 \rightarrow ^5I_8$	2,0600	~250	0,5	—	—	имп.	77	Xe
	$\text{CaF}_2\text{-YF}_3$	$^5I_7 \rightarrow ^5I_8$	2,0318	~80	3	—	~90	»	90	Xe
								»	77	Xe
	(+ Er^{3+} , Tm^{3+} , Yb^{3+})	$^5I_7 \rightarrow ^5I_8$	2,05	—	0,5	—	—	»	100	Xe
			2,06	—	—	—	—	»	298	Xe
	CaMoO_4	$^5I_7 \rightarrow ^5I_7$	2,0740	~250	0,5	1,3	—	»	77	Xe
								»	20	Xe
			2,0707	—	—	—	—	»	77	Xe
			2,0556	—	—	—	—	»	77	Xe
	$\text{Ca}(\text{NbO}_3)_2$	$^5I_7 \rightarrow ^5I_8$	2,047	—	0,5	2,2	—	»	77	Xe
	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$	$^5I_7 \rightarrow ^5I_8$	~2,075	—	—	—	—	»	77	Xe
	(+ Cr^{3+})							»	77	Xe
	CaWO_4	$^5I_7 \rightarrow ^5I_8$	2,046	230	0,5	—	—	имп.	77	Xe
	$\text{CaY}_4(\text{SiO}_4)_3\text{O}$	$^5I_7 \rightarrow ^5I_8$	2,059	—	—	—	—	»	77	Xe
	(22,5% Er^{3+} , 0,5% Tm^{3+})		—	—	2,5	—	—	»	77	Xe
	Er_2O_3	$^5I_7 \rightarrow ^5I_8$	2,121	—	—	—	—	»	77	Xe
								»	145	Xe
								непр.	77	W
	$\text{Er}_{1,5}\text{Y}_{1,5}\text{Al}_5\text{O}_{12}$	$^5I_7 \rightarrow ^5I_8$	2,0979	462	—	—	—	имп.	77	Xe
								непр.	77	Hg
								»	77	W
			2,0917	—	—	—	—	имп.	77	Xe
			~2,123	—	—	—	—	»	77	Xe
	HoF_3	$^5I_7 \rightarrow ^5I_8$	2,090	377	100	2,6	1,5	»	77	Xe
	LiNbO_3	$^5I_7 \rightarrow ^5I_8$	2,0786	310	—	—	—	»	77	Xe
	LiYF_4	$^5I_7 \rightarrow ^5I_8$	2,066	—	2,0	20	—	»	77	Xe
	(5% Er^{3+})							»	77	Xe
	$\alpha\text{-NaCaErF}_6$	$^5I_7 \rightarrow ^5I_8$	2,0345	~120	~1	—	~120	»	150	Xe
			2,0312	—	—	—	~100	»	77	Xe
			2,0377	—	—	—	—	»	77	Xe
	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	$^5I_7 \rightarrow ^5I_8$	2,0914	—	—	~4	—	»	77	Xe

Ионы	Кристалл	Лазерный переход	λ , мкм	E_l , см ⁻¹	C, %	τ_F , мсек	$\delta\nu_F$, см ⁻¹	Режим работы	T, °K	Накачка	
Гольмий HO ³⁺ , 4f ¹⁰	(0,5% Cr ³⁺)		2,0975	462	—	—	—	имп.	77	Xe	
			2,1223	518	—	—	—	»	77	Xe	
			2,0975	462	—	—	—	»	77	Xe	
			2,1223	518	—	—	—	непр.	85	W	
								имп.	77	Xe	
	(50% Er ³⁺ 6,7% Tm ³⁺)	⁵ I ₇ → ⁵ I ₈	2,0982	462	5	—	—	—	имп.	85	Hg
			2,1227	518	—	—	—	—	»	85	W
									непр.	77	Xe
			2,1288	532	—	—	—	—	имп.	85	W
			2,13	532	5	3,0	—	—	»	295	Xe
	YAlO ₃ (50% Er ³⁺ 6,7% Tm ³⁺) Y ₃ Fe ₅ O ₁₂ (5% Er ³⁺ 5% Tm ³⁺) CaF ₂	⁵ I ₇ → ⁵ I ₈	2,119	474	1,67	4,8	9,8	непр.	77	Xe	
							17	имп.	77	W	
								»	300	Xe	
		⁵ I ₇ → ⁵ I ₈	2,086	—	2	—	—	—	»	77	Xe
			2,0905	—	—	—	—	—	»	77	Xe
Эрбий Er ³⁺ , 4f ¹¹		⁴ I _{13/2} → ⁴ I _{15/2}	1,617	~400	0,1	20	—	»	77	Xe	
		⁴ I _{13/2} → ⁴ I _{15/2}	1,5298	~30	0,05	0,8—1,3	—	»	4	Xe	
			1,5308	—	—	—	—	»	4	Xe	
		⁴ S _{3/2} → ⁴ I _{13/2}	0,8456	~6200	4—8	~1	~10	»	77	Xe	
			0,8548	—	—	—	—	»	77	Xe	
		⁴ S _{3/2} → ⁴ I _{11/2}	1,26	~10 000	0,1	0,3	—	»	77	Xe	
		⁴ S _{3/2} → ⁴ I _{9/2}	1,696	12 413	0,1	0,3	—	»	77	Xe	
			1,715	—	—	—	—	»	77	Xe	
			1,726	—	—	—	—	»	77	Xe	
			2,69	~6200	12,5	4,5	—	»	298	Xe	
	CaF ₂ -ErF ₃ -TmF ₃	⁴ I _{11/2} → ⁴ I _{13/2}									
	CaF ₂ -YF ₃	⁴ I _{13/2} → ⁴ I _{15/2}	1,5448	~180	5	—	~16	»	77	Xe	
			1,5558	~260	—	—	~20	»	77	Xe	
	Ca (NbO ₃) ₂	⁴ I _{13/2} → ⁴ I _{15/2}	1,61	~400	—	—	—	»	77	Xe	
	CaWO ₄	⁴ I _{13/2} → ⁴ I _{15/2}	1,612	375	1,0	—	~10	»	77	Xe	
LaF ₃	⁴ I _{13/2} → ⁴ I _{15/2}	1,6113	400	0,05	—	—	»	77	Xe		
Тулий Tm ³⁺ , 4f ¹²	YAlO ₃	⁴ S _{3/2} → ⁴ I _{9/2}	1,663	12 400	0,5	0,12	—	»	295	Xe	
	Y ₃ Al ₅ O ₁₂	⁴ I _{13/2} → ⁴ I _{15/2}	1,6602	525	—	—	—	»	77	Xe	
			1,6452	525	—	—	—	»	77	Xe	
	(5% Yb ³⁺)		1,6459	459	1,0	9,1	~20	»	295	Xe	
	CaF ₂ -ErF ₃ (12,5%)	³ H ₄ → ³ H ₆	1,860	~300	0,5	2,9	—	»	100	Xe	
	CaF ₂ -ErF ₃	³ H ₄ → ³ H ₆	1,894	~350	0,5	—	—	»	77	Xe	
		³ H ₄ → ³ H ₆	1,9	—	1,0	6	—	»	77	Xe	

Ионы	Кристалл	Лазерный переход	λ , мкм	E_l , см ⁻¹	C , %	τ_F , мсек	$\delta\nu_F$, см ⁻¹	Режим работы	T , °К	Накачка
Иттербий Yb^{3+} , 4f ¹³	$CaMoO_4$	$^3H_4 \rightarrow ^3H_6$	1,9115	~325	0,5	$\geq 0,9$	~10	непр.	77	Xe
	(0,75% Er^{3+})		1,9060	—	—	—	—	имп.	77	Xe
	$Ca(NbO_3)_2$	$^3H_4 \rightarrow ^3H_6$	1,91	—	—	—	—	»	77	Xe
	$CaWO_4$	$^3H_4 \rightarrow ^3H_6$	1,911	~325	—	—	~10	»	77	Xe
			1,916	—	—	—	—	»	77	Xe
	Er_2O_3	$^3H_4 \rightarrow ^3H_6$	1,934	~300	0,5	2,9	—	»	77	Xe
								непр.	~80	W
	$Er_{1,5}Y_{1,5}Al_5O_{12}$	$^3H_4 \rightarrow ^3H_6$	1,880	228	—	15	—	имп.	77	Xe
			1,884	240	—	—	—	»	77	Xe
			2,014	582	—	—	—	непр.	85	W
	$LiNbO_3$	$^3H_4 \rightarrow ^3H_6$	1,8532	271	—	—	—	имп.	77	Xe
	$\alpha-NaCaErF_6$	$^3H_4 \rightarrow ^3H_6$	1,8580	~470	~1,0	—	~70	»	77	Xe
							75	»	150	Xe
			1,8885	~540	—	—	~50	»	77	Xe
	SrF_2	$^3H_4 \rightarrow ^3H_6$	1,972	—	—	10	—	»	77	Xe
	$Y_3Al_5O_{12}$	$^3H_4 \rightarrow ^3H_6$	1,8834	240	—	15	—	»	77	Xe
			2,0132	582	—	—	—	»	77	Xe
	(0,5% Cr^{3+})		2,0132	582	—	—	—	непр.	85	W
								имп.	77	Xe
								непр.	85	Hg
								»	85	W
			2,019	600	—	—	—	имп.	295	Xe
	CaF_2	$^2F_{5/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$	1,0336	—	5—10	—	—	»	~120	Xe
	(1—2% Nd^{3+})									
	$Y_3Al_5O_{12}$	$^2F_{5/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$	1,0296	623	—	~1	~10	»	77	Xe
Актиниоды										
Уран U^{3+} , 5f ³	BaF_2	$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2,556	107	—	0,15	—	»	20	Xe
	CaF_2	$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2,613	609	—	<0,015	—	»	300	Xe
						0,095	—	»	90	Xe
						0,135	—	»	20—77	Xe
								непр.	77	Hg
			2,57	609	—	—	—	имп.	300	Xe
			2,51	470	—	—	~30	»	77	Xe
			2,44	398	—	—	—	»	77	Xe
			2,24	0	—	—	—	»	77	Xe
	SrF_2	$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2,407	334	0,1	0,06	—	»	90	Xe
						0,08	—	»	77	Xe
						0,11	—	»	20	Xe



Рис. 33.42. Схема наблюдаемых уровней энергии трехвалентных ионов редкоземельных элементов [6]. Ширина уровней показывает полное расстояние между штарковскими компонентами в безводных трихлоридах. Полу-
 кружки под уровнями означают, что наблюдается люминесценция, обусловленная переходами с данного уровня.

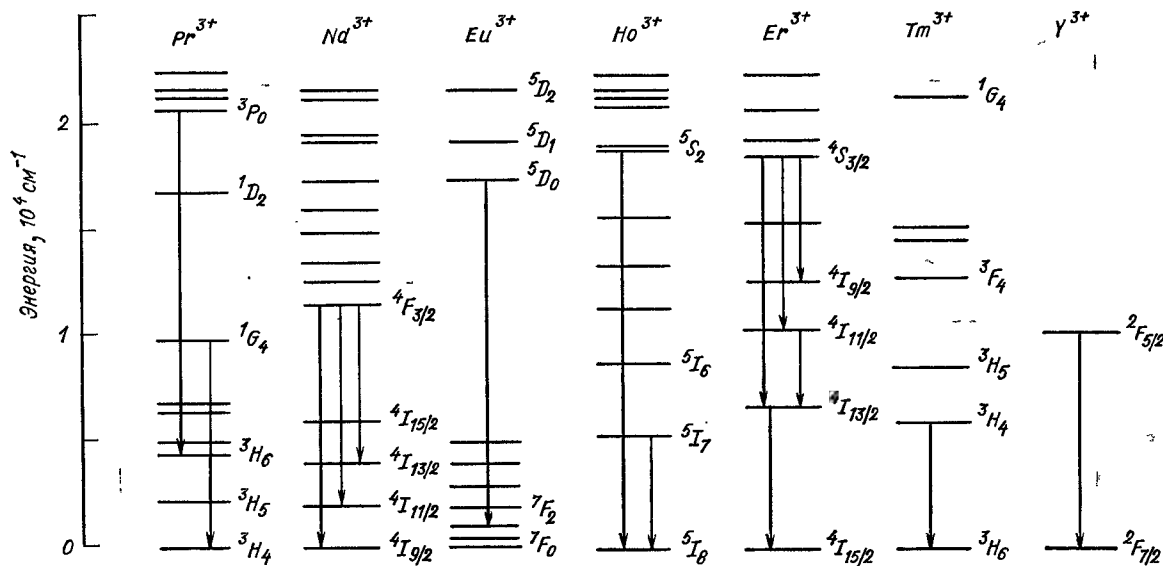


Рис. 33.43. Подробная схема уровней энергии и лазерных переходов (указаны стрелкой) трехвалентных ионов редкоземельных элементов [6].

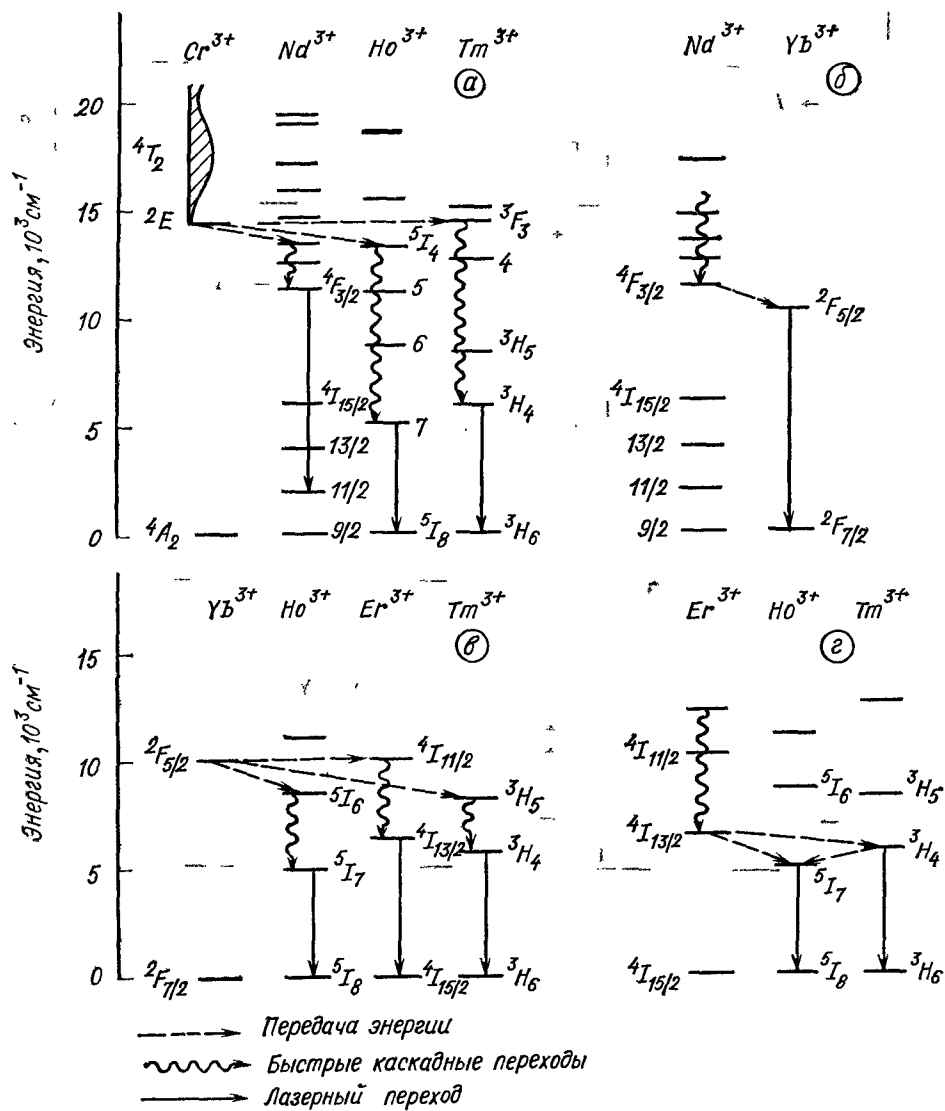


Рис. 33.44. Энергетическая схема процесса сенсibilизации и соответствующие лазерные переходы в кристаллах [6]. Сенсibilизация ионами: а — Cr^{3+} кристаллов с ионами Nd^{3+} , Ho^{3+} , Tm^{3+} ; б — Nd^{3+} кристаллов с ионами Yb^{3+} ; в — Yb^{3+} кристаллов с ионами Ho^{3+} , Er^{3+} , Tm^{3+} ; г — Er^{3+} кристаллов с ионами Ho^{3+} и Tm^{3+} .

Сенсибилизаторы в стекле [7]

Активатор	Сенсибилизатор	Тип стекла (массовое содержание, %)
Nd^{3+}	Ce^{3+} $\text{Mn}^{2+}, \text{Ce}^{2+}$ UO_2^{2+}	Li-Mg-алюмосиликатное (SiO_2 — 56,7; Li_2O — 7,4; MgO — 29,6; Al_2O_3 — 5,7) Кальцевофосфатное Баритовый крон (SiO_2 — 75,1; K_2O — 12,2; BaO — 12,5; Sb_2O_3 — 0,2)
Tb^{3+}	Dy^{3+} Gd^{3+} $\text{Ce}^{3+}, \text{Ce}^{2+}$	Боросиликатное Кальцевоборатное (BrO_3 — 70,0; Li_2O — 10,0; CaO — 20,0) Кальцевофосфатное
Ho^{3+}	Yb^{3+}	Li-Mg-алюмосиликатное (SiO_2 — 56,7; Li_2O — 7,4; MgO — 29,6; Al_2O_3 — 5,7)
Er^{3+}	Yb^{3+}	Na-K-Ba-силикатное (SiO_2 — 73,2; Na_2O — 12,0; K_2O — 12,8; BaO — 2,0)
Yb^{3+}	Nd^{3+} Ce^{3+} $\text{Ce}^{3+} + \text{Nd}^{3+}$ $\text{UO}_2^{2+} + \text{Na}^{3+}$	Кальцевоборатное (BrO_3 — 70,0; Li_2O — 10,0; CaO — 20,0) Li-Mg-алюмосиликатное (SiO_2 — 56,7; Li_2O — 7,4; MgO — 29,6; Al_2O_3 — 5,7) То же Баритовый крон (SiO_2 — 75,1; K_2O — 12,2; BaO — 12,5; Sb_2O_3 — 0,2)

Таблица 33.11

Характеристики промышленных лазерных стекол некоторых зарубежных фирм
Все стекла содержат активный ион Nd^{3+}

Характеристика	Лазерные стекла фирм											
	American Optical				Owens-Illinois	Schott						Sovirel
	NS-2024	NS-1838	NS-102C	NS-0835	ED-2	LG52	LG54	NG55	LG56	LG57	LG580	913
Концентрация: по массе окисла, % ионов, $10^{20}/\text{см}^3$	1,0 0,9	2,0 1,8	3,0 2,8	5,0 4,6	3,1 2,83	2 2,7	2 3,1	5 4,6	3 2,9	0,8 0,7	3,0 2,8	3,0 2,8
Время люминесценции, мсек	0,64	0,63	0,62	0,57	0,3	0,15	0,08	0,6	0,65	0,6	0,64	0,7
Длина волны генерации, мкм	1,06	1,06	1,06	1,06	1,0623	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Ширина линии люминесценции, нм	—	—	—	26	26	36	37	22	22	21	22	—
Потери*, %/см	—	—	—	—	0,5	—	—	—	—	—	—	0,07
Показатель преломления: для 589,3 нм для 1060 нм	1,5109 1,501	1,5135 1,5034	1,5143 1,5045	1,5196 1,5093	— 1,5559	1,6769 —	1,6943 —	1,5226 1,51	1,5199 1,5093	1,5171 1,5065	1,5199 1,5091	1,517 1,5067

Характеристика	Лазерные стекла фирм											
	American Optical				Owens- Illinois	Schott						Sovirel
	NS-2024	NS-1838	NS-1020	NS-0835	ED-2	LG52	LG54	LG55	LG56	LG57	LG530	915
Поглощение ^{2*} , %/см	0,2	0,2	0,2	0,2	—	0,51	0,51	0,73	0,51	0,73	0,1— —,2	0,23
Плотность, г/см ³	2,54	2,56	2,59	2,63	2,547	3,77	4,34	2,62	2,69	2,59	2,59	2,6
Коэффициент теплопроводности, $\text{вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$: при 0°C при 100°C	—	—	—	—	—	0,8	0,6	0,93	0,93	1,16	0,99	0,84
	—	—	—	0,8	1,21	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	0,91	1,35	—	—	—	—	—	—	—
Удельная теплоемкость, $\text{кал}/(\text{г} \cdot \text{град})$	—	—	—	0,14	—	—	—	—	—	—	—	0,2
Коэффициент теплового расширения, $10^{-6}/(\text{град} \cdot \text{см})$	10,8	10,2	11,11	10,3	10,3	7,2	8,6	9,1	9,3	9,6	9,7	9,6
Твердость по Кнупу, $\text{кг}/\text{мм}^2$	432	441	468	490	544	671	677	450	475	391	365	404

* Измерения для длины волны генерации при наличии излучения накачки.

** Измерения для длины волны генерации без излучения накачки.

Таблица 33.12

Характеристики лазерных стекол с ионами неодима, изготавливаемых в СССР [9—11]

Характеристика	Тип стекла (основа)				
	КГСС-3 (силикатная)	ГЛС-1 (силикатная)	ГЛС-4 (силикатная)	ЛГС-54 (фосфатная)	ЛГС-55 (борфосфатная)
Массовая концентрация ионов Nd^{3+} , %	1,95	2,0	5,0	1—5	1—4
Плотность, г/см ³	2,90	2,66	2,66	2,8	2,7
Показатель преломления*	1,534	1,522	1,515	1,57	1,54
Средняя дисперсия, 10^6	—	913	907	1270	870
Время люминесценции, мкс	550	360	430	230—260	180—230
Ширина линии люминесценции, нм	—	21,4	20,8	21,0	22,0

Характеристика	Тип стекла (основа)				
	КГСС-3 (силикатная)	ГЛС-1 (силикатная)	ГЛС-4 (силикатная)	ЛГС-54 (фосфатная)	ЛГС-55 (... .. тная)
Потери* (без накачки), 10^{-3} см^{-1}	1—3	1—3	1—3	1—4	1—3
Термооптическая постоянная*, $10^{-7} \text{ град}^{-1}$	—17	38	34	—31	—2,5
Коэффициент линейного расширения, $10^{-7} \text{ град}^{-1}$	102	92	100	170	116
Температурный коэффициент показателя преломления*, $10^{-7} \text{ град}^{-1}$	—38	—13	—18,5	—	—
Оптический коэффициент напряжения ^{2*} , $\text{мкм} \cdot \text{см} \cdot \text{кг}^{-1}$		2,4	2,5	—	—
Удельная теплоемкость, $\text{ккал}/(\text{кг} \cdot \text{град})$	0,16	0,165	0,165	—	—
Коэффициент теплопроводности, $\text{ккал}/(\text{м} \cdot \text{град})$	0,76	0,84	0,60	—	—
Модуль Юнга, $\text{кг} \cdot \text{мм}^{-2}$	6500	7500	7500	—	—
Коэффициент Пуассона	0,247	0,229	0,23	—	—

* Для длины волны генерации $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$.^{2*} Для $\lambda = 0,546 \text{ мкм}$.

33.6. ЛАЗЕРЫ НА ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Полупроводниковые лазеры используют в качестве активных элементов неорганические вещества (кристаллы), обладающие свойствами полупроводников. В отличие от лазеров на примесных кристаллах генерация излучения в полупроводниках происходит не на переходах между уровнями примесных ионов, а на переходах между зоной проводимости и валентной зоной или между зонами и уровнями, образуемыми примесями в запрещенной зоне, самого полупроводника. Таким образом, активным веществом является сама кристаллическая матрица, а примеси служат источником зарядов (электронов и дырок), рекомбинация которых приводит к возникновению фотонов.

Для создания инверсии в полупроводниках используют четыре типа возбуждения: инжекцию носителей

заряда, облучение пучком быстрых электронов, оптическую накачку и ударную ионизацию (лавинный пробой).

Наибольшую эффективность имеют два первых типа накачки, которые и имеют наибольшее распространение. Существующие лазеры на полупроводниках, длины волн генерации и используемые виды возбуждения перечислены в табл. 33.13.

Для работы большинства полупроводниковых лазеров требуются низкие (от 1,7 до 77°K) температуры. При комнатных температурах генерация осуществлена пока только для лазеров на ZnO , CdS , $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$, $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}$ и GaAs . Из них благодаря доступности кристаллов хорошего качества и необходимой чистоты наибольшее распространение имеет арсенид галлия. Основные физические свойства арсенида галлия приведены ниже.

Физические свойства арсенида галлия [7]

Молекулярная масса	144,63
Плотность при 25°C, г/см ³	5,3161±0,0002
Структура	кубическая
Пространственная группа	$F\bar{4}3m$
Тип решетки	B3, сфалерит
Постоянная решетки, Å	5,6534±0,0002
Твердость:	
по Моосу	4,5
по Кнупу, кг/мм ²	750±42
Температура плавления, °C	1238
Теплота плавления, ккал/моль	10,5±2,5
Температура Дебая (при 270°K), град	355

Коэффициент теплового расширения, град⁻¹:

при — 233°C	—0,5·10 ⁻⁶
при — 218°C	0,0
при — 195 ÷ +17°C	3,64·10 ⁻⁶
Диэлектрическая постоянная при 20°C и частоте 0,2—3 Мгц	12,53
Подвижность электронов при 15°C, см ² /(в·сек)	1,1·10 ⁴
Подвижность дырок при 25°C, см ² /(в·сек)	4,5·10 ²
Эффективная масса электрона	0,043—0,071
Собственное удельное сопротивление, ом·см	3,7·10 ⁸

Таблица 33.13

Длина волны генерации полупроводниковых лазеров [12]*

Вещество	λ , мм	E , эв	Тип возбуждения			
			Инжекция носителей	Электронный пучок	Оптический	Лавина
ZnS	0,33	3,8		+	+	
ZnO	0,37	3,4		+		
Zn _{1-x} Cd _x S	0,32—0,49	2,5—3,82			+	
ZnSe	0,46	2,7		+		
CdS	0,49	2,5		+	+	
ZnTe	0,53	2,3		+		
GaSe	0,59	2,1		+		
CdSe _{1-x} S _x	0,49—0,68	2,5—1,8		+	+	
CdSe _{0,95} S _{0,05}	0,675	1,8			+	
CdSe	0,675	1,8		+	+	
Al _{1-x} Ga _x As	0,63—0,90	2,0—1,4	+			
GaAs _{1-x} P _x	0,61—0,90	2,0—1,4	+	+		
CdTe	0,785	1,6		+		
GaAs	0,83—0,91	1,50—1,38	+	+	+	+
InP	0,91	1,36	+			+
GaAs _{1-x} Sb _x	0,95—1,5	1,4—0,83	(+)			
CdSnP ₂	1,01	1,25		+		
InAs _{1-x} P _x	0,9—3,2	1,4—0,39	(+)			
InAs _{0,94} P _{0,06}	0,942	1,32	+			
InAs _{0,51} P _{0,49}	1,6	0,73	+			
GaSb	1,55	0,80	+	+		
In _{1-x} Ga _x As	0,58—3,1	2,14—0,4	+			
In _{0,65} Ga _{0,35} As	1,77	0,70	+			
In _{0,75} Ga _{0,25} As	2,07	0,60	+			
Cd ₃ P ₂	2,1	0,58			+	
InAs	3,1	0,39	+	+		
InAs _{1-x} Sb _x	3,1—5,4	0,39—0,23	+			
InAs _{0,98} Sb _{0,02}	3,19	0,39	+			
Cd _{1-x} Hg _x Te	3—15	0,41—0,08		+	+	
Cd _{0,32} Hg _{0,68} Te	3,8	0,33			+	
Te	3,72	0,334		+		
PbS	4,3	0,29	+	+		
InSb	5,2	0,236	+	+	+	+
PbTe	6,5	0,19	+	+		
PbS _{1-x} Se _x	3,9÷8,5	0,32÷0,146	+	+		
PbSe	8,5	0,146	+	+		
PbSnTe	28	0,045	+			
PbSnSe	8—31,2	0,155—0,040	+			

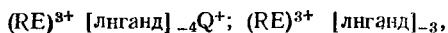
* Крестиком помечены осуществленные, а крестиком в скобках — возможные, но еще не осуществленные типы возбуждения

33.7. ЖИДКОСТНЫЕ ЛАЗЕРЫ

Жидкостные лазеры используют в качестве активных элементов растворы, содержащие ионы редкоземельных элементов. Все эти лазеры работают только в импульсном режиме с оптической накачкой излучением ксеноновых газоразрядных ламп.

Лазеры на хелатах редкоземельных элементов

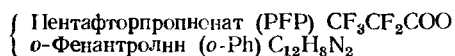
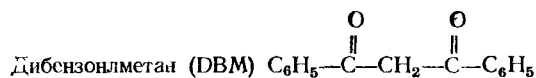
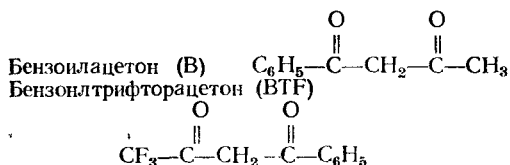
Хелаты составляют класс лазерных материалов, в которых активными элементами являются трехвалентные ионы редких земель (RE), связанные с органическими группами или лигандами. Различают два главных типа лазерных компаундов:



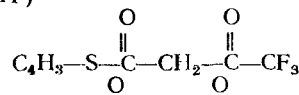
где Q^{+} обозначает катнон.

Наиболее часто в лазерах на хелатах редкоземельных элементов употребляют следующие лиганды, катионы и растворители.

Лиганды:



Теноилтрифторацетон (ТТФ)



Катионы: пиперидин; пиридин; натрий; аммиак и его производные; нмидазол.

Растворители: смесь спиртов (этанол—метанол 3 : 1); смесь (спирт—диметилформамид (DMFA); ацетонитрил; диметилсульфоксид.

Во всех лазерах на хелатах лазерный эффект осуществляется на переходах между энергетическими уровнями ионов редкоземельных элементов, а поглощение энергии накачки происходит через полосы поглощения лиганда. На рис. 33.45 показано расположение уровней лазера на ионах европия наиболее хорошо исследованной системы.

Основные генерационные характеристики существующих лазеров на хелатах приведены в табл. 33.14. Хелаты имеют очень большие коэффициенты поглощения ($\sim 100 \text{ см}^{-1}$), поэтому лазерный эффект осуществляется только в тонких слоях вещества ($\sim 1 \text{ мм}$).

Таблица 33.14

Генерационные характеристики лазеров на хелатах редкоземельных элементов [13]

Ион	Лиганд	Растворитель	Концентрация ионов, 10^{18} см^{-3}	Длина волны лазерного перехода, нм	Рабочая температура, °C	Время флуоресценции, мксек	Ширина линии, см^{-1}	Лазерный переход	Расщепление основного уровня, 10^4 см^{-1}	Полоса поглощения, нм	Поглощение в максимуме полосы, $10^4 / (\text{моль} \cdot \text{см})$
Eu ³⁺	B ₄	Смесь спиртов или DMFA	1—15	611,1—613,1	от —150 до —130	0,8	20	⁵ D ₀ — ⁷ F ₂	9	280—380	6,8
Eu ³⁺	[DBM] ₄	DMFA	9	612,0	—145	—	6	⁵ D ₀ — ⁷ F ₂	9	—	1—10
Eu ³⁺	[TTF] ₄	Ацетонитрил	3	612,5	—35	—	25	⁵ D ₀ — ⁷ F ₂	9	—	1—10
Eu ³⁺	[BTF] ₄	Ацетонитрил	6	611,9	+30	0,8	34	⁵ D ₀ — ⁷ F ₂	9	—	1—10
Tb ³⁺	[TFA] ₃	Ацетонитрил, n-диоксан	1,5	547,0	+30	—	—	⁵ D ₄ — ⁷ F ₅	—	—	—
Nd ³⁺	PFP o-Ph	Диметилсульфоксид	120	1057,0	—30	0,005	140	⁴ F _{3/2} — ⁴ I _{11/2}	20	Nd ³⁺	—

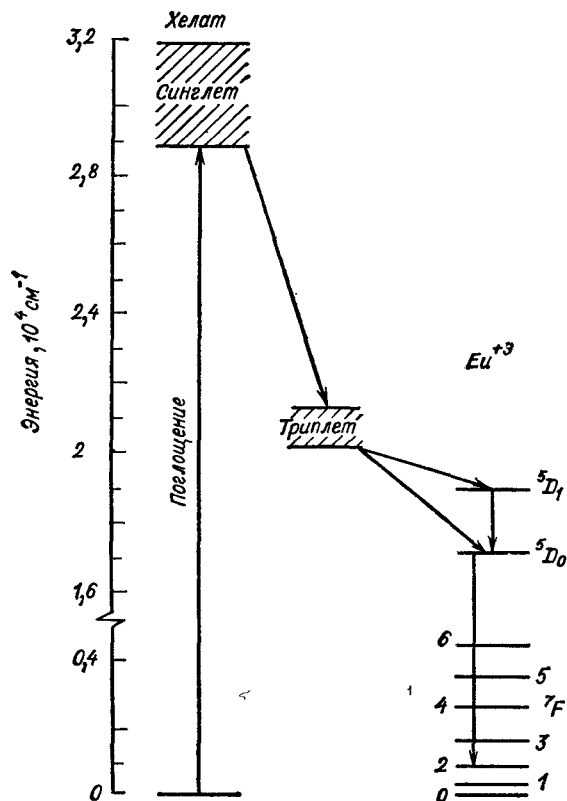


Рис. 33.45. Расположение энергетических уровней в лазере на хелате европия [13]. Поглощение энергии иакчески осуществляется между основным и синглетным состоянием лиганда с последующим переходом в триплетное состояние и передачей возбуждения нону Eu^{3+} . Флуоресценция и лазерный эффект происходят при переходах между $8D_0$ - и $7F_2$ -уровнями иона европия.

Апротонные лазерные жидкие материалы состоят из растворов солей редкоземельных элементов в неорганических растворителях. Лазерный эффект был достигнут пока только для ионов неодима Nd^{3+} в селен- и фосфороксихлоридах. Основные генерационные характеристики этих лазеров приведены в табл. 33.15. Типичные спектры поглощения ионов неодима показаны на рис. 33.46. Значения поглощения в максимумах полос поглощения неодима в зависимости от типа неорганического растворителя указаны в табл. 33.16. Общие характеристики апротонных лазеров на ионах неодима:

Температура раствора, °C	+30°C
Концентрация ионов, 10^{20} см^{-3}	0,5—3
Лазерный переход	$4F_{3/2} - 4I_{11/2}$
Ширина линии люминесценции, см^{-1}	~120
Расщепление основного уровня, см^{-1}	~2000

Таблица 33.15

Материалы апротонных лазеров [12]

Растворитель (x)*	Длина волны лазерного перехода, нм	Время флуоресценции, мсек	Сечение излучения, 10^{-20} см^2
$\text{SeOCl}_2 + \text{SnCl}_4 (0,5 \text{ M})$	1055	0,280	8
$\text{POCl}_3 + \text{SnCl}_4 (1,0 \text{ M})$	1330	—	0,7
$\text{POCl}_3 + \text{ZrCl}_4 (0,45 \text{ M})$	1051	0,300	6
	1051	0,330	~6

* Состав растворителей: 1 л оксихлорида плюс x молей тетрахлорида.

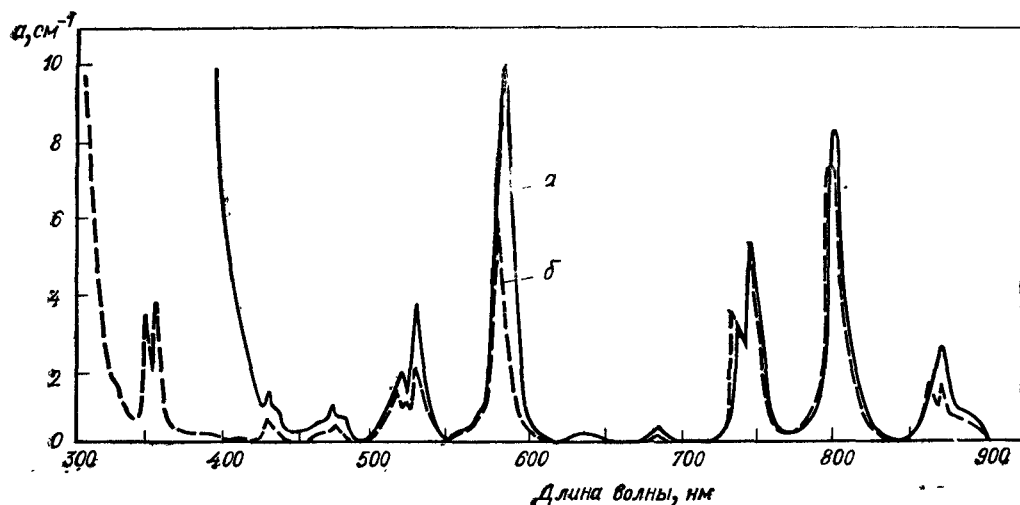


Рис. 33.46. Типичные спектры поглощения ионов Nd^{3+} в апротонных растворителях [13].

Таблица 33.16

Поглощение в максимумах полос поглощения ионов Nd^{3+} в различных неорганических растворителях [12]

Длина волны максимума полосы поглощения, нм	Поглощение в максимуме, $\lambda/(\text{моль} \cdot \text{см})$	
	$\text{SeOCl}_2 + \text{SnCl}_4$	$\text{POCl}_3 + \text{SnCl}_4$ или $\text{POCl}_3 + \text{ZrCl}_4$
350	—	11,7
520	11,7	6,7
580	33,3	2,0
750	16,7	16,7
800	26,7	26,7
870	10,0	5,0

33.8. ЛАЗЕРЫ НА ХИМИЧЕСКИХ КРАСИТЕЛЯХ

Среди различных химических красителей в настоящее время лазерный эффект получен для шести классов органических красителей: оксазольных, антраценовых, кумариновых, акридиновых, ксантеновых и полиметиновых. Большинство красителей этих классов имеют схожие спектральные характеристики:

1. Ширины основных полос поглощения и испускания обычно имеют порядок 1000 см^{-1} . Одна или несколько полос поглощения могут находиться в более коротко-

волновой области спектра по сравнению с основным поглощением.

2. Максимум флуоресценции находится в более длинноволновой области, чем главный максимум поглощения. Величина сдвига между спектрами и ширина спектров флуоресценции и поглощения могут быть такими, что коротковолновый край спектра флуоресценции существенно перекрывает длинноволновый край спектра поглощения.

3. Спектр флуоресценции обычно зеркально отображает спектр основной полосы поглощения.

4. Время флуоресценции обычно составляет $5 \cdot 10^{-9} \text{ сек}$.

5. Расположение, величина, структура полос поглощения и флуоресценции, а также время флуоресценции в значительной мере зависят от типа растворителя и концентрации раствора.

В связи с тем что время флуоресценции типичного красителя составляет $5 \cdot 10^{-9} \text{ сек}$, источник оптической накачки для лазеров на красителях должен обеспечивать высокие мощности накачки, чтобы превысить потери на спонтанное излучение. Необходимую мощность накачки можно получить, используя разнообразные импульсные лампы или интенсивное излучение другого лазера. Второй способ дает значительно большую мощность накачки и более эффективен. Органические красители, для которых наблюдался лазерный эффект, перечислены в табл. 33.17 [14]. Здесь же приведены длины волн центра линии генерации, полученные как при накачке другим лазером, так и при накачке излучением импульсной газоразрядной лампы.

Лазеры на химических красителях [14]

Таблица 33.17

Органическое соединение	Растворитель	Длина волны генерации при лазерной (ламповой) накачке, нм	Органическое соединение	Растворитель	Длина волны генерации при лазерной (ламповой) накачке, нм
<i>n</i> -Терфенил	Циклогексан	341 (341)	РОРОР, или <i>p</i> -бис-[2-(5-фенил-оксазолил)] бензол	Этанол, толуол	421 (419)
2,5-Дифенил-1, 3, 4-оксадиазол	Диоксан	(348)	Диметил РОРОР, или 1,4-бис-2-(4-метил-5-фенил-оксазолил)бензол	Этанол, циклогексан	423
2,5-Ди- <i>n</i> -метоксифенил-3,4-оксадиазол	Этанол	359	Бис-MSB, или <i>p</i> -бис-(<i>o</i> -метилстирил)бензол	Толуол, бензол	431
Изопропил-2-фенил-5 (4-бифенил)-1,3,4-оксадиазол	"	372 (369,8)	2'-Метокси-1,4-дистирилбензол	Толуол	425
2,5-Дифенилфуран	Диоксан	(371)	1,2-Ди-(α -нафтил)этилен	"	425 (424)
<i>n</i> -Кватерфенил	DMF	(374)	2,2'-Диметокси-1,4-дистирилбензол	"	426
2,5-Дифенил-оксазол	Диоксан	(381)	1-Стирил-4[ω -винил-(<i>n</i> -бифенилил)] бензол	"	430
Дифенилбутadiен	Толуол	383	9, 10-Дифенилантраценов	Циклогексан	432
4-Метилбеллиферон	"	385—574*	Акридон	Этанол	437 (435)
2-Бифенил-5-стирил-1,3,4-оксадиазол	Толуол	390,5	2,5-Бис-[5-трет-бутилбензо-ксазолил (2)] тиофен	Бензол	437
α NND, или 2,5-ди(α -нафтил)-1,3,4-оксадиазол	"	391	3-Этиламинопирин-5,8,10-трисульфокислота	Вода	441
α NPO, или 2-фенил-5- α -нафтил-1,4-оксазол	"	399,5 (400)	7-Метиламино-4,6-диметилкумарин	Этанол	443
2-Гидрокси-4-метил-7-аминохинолин	Этанол	(413)	7-Этиламино-4,6-диметилкумарин	"	(446)
1,2-Ди-4-бифенилэтилен	Толуол	408	Кальцеин голубой	"	(449—490)
ВВО, или 2,5-Дибифенилиноксазол	Бензол	408,5	9-Аминоакридин гидрохлорид	"	(458,5)
<i>p</i> , <i>p'</i> -Дифенилстильбен	"	408,5 (409)	4-Метилумбеллиферон, или 4-метил-7-гидроксикумарин	Вода (pH~9)	450
1, 4-Дистирилбензол	Толуол	415	7-Диэтиламно-4-метилкумарин	Этанол	450 (460)
1, 4-Ди[2-(5-фенил-оксазолил)]бензол	"	417			
Бис-MSB, или <i>p</i> -бис (<i>o</i> -метилстирил)бензол	Этанол	419 (420)			
4, 4'-Дихлор-1,4-дистирилбензол	Толуол	420 (419)			

* Зависит от pH-растворителя.

Органическое соединение	Растворитель	Длина волны генерации при лазерной (ламповой) накачке, нм	Органическое соединение	Растворитель	Длина волны генерации при лазерной (ламповой) накачке, нм
Эскулин	Вода (рН~9)	(460)	3,3'-Диэтил-2,2'-оксатрикарбоцианин иодид	Ацетон	744
7-Гидроксикумарин, или умбеллиферон	»	(~460)	1,1'-Диметил-11-бром-2,2'-хинодикарбоцианин иодид	Глицерин	745
Бензил-β-метилумбеллиферон	Этанол	(460)	1,1'-Диэтил-4,4'-хинокарбоцианин иодид или криптоцианин	»	745
2,4,6-Трифенилпирил фторборат	Метанол	485	1,1'-Диметил-4,4'-хинокарбоцианин иодид	»	749
3-Аминофталимид	Изоамиловый спирт	500	1,1'-Диэтил-2,2'-дикарбоцианин иодид	»	750
7-Метиламино-4,6-диметилкумарин	Этанол слабо кислый	(484)	Голубой В	»	753
1,3-Дифенилизобензофуран	кислый	(487)	1,1'-Диэтил-4,4'-хинокарбоцианинбромид	»	754
Бриллиантовый сульфоплавин	Этанол	(484—518)	Дицианин	»	756
Трипфлавин	»	(508—573)	Нафталин зеленый	»	756
Акрифлавин гидрохлорид	»	505	Родулин голубой 6G	»	758
Флуоресцеин	»	510 (517 5)	Фталоцианин магния	Хинолин	759
	Водный раствор щелочи	518	Бриллиантовый зеленый или малахитовый зеленый G	Изоамиловый спирт	760
6-Карбоксифлуоресцеин	Этанол	(539—548)	1,1'-Диэтил-γ-циано-2,2'-дикарбоцианинтетрафторборат, или DTCDCT	Диметилсульфоксид	761,5
Na-Флуоресцеин	Вода, этанол	527 (545)	Хлороалюминиевый фталоцианин	Этанол	770
Эозин	Этанол	540	3-Этил-3'-метилтиазолино-трикарбоцианин иодид	Ацетон	774
2,7-Дихлорофлуоресцеин	»	(545)	3,3'-Диэтил-10-хлор-2,2'-(4,5,4',5'-дibenzo)-тиадикарбоцианин иодид	Этанол	785,5
Родамин 6 G	Этанол, полиметилметакрилат	555 (595)	3,3'-Диэтил-11-метокситиатрикарбоцианин иодид	»	793,5
Монобромфлуоресцеин	Глицерин	560	1,3,3,1',3',3'-Гексаметил-линдотрикарбоцианин иодид	Метанол	797
Уранин	Этанол	560	1,1'-Диэтил-γ-ацетокси-2,2'-дикарбоцианинтетрафторборат	Пиридин	800
Пина (орто)	»	565	1,1'-Диэтил-γ-нитро-4,4'-дикарбоцианинтетрафторборат, или DTNDCT	Этанол	807,5
Дибромфлуоресцеин	Глицерин	568	3,3'-Диэтилтиатрикарбоцианин иодид	Глицерин	809
Родамин В	Этанол	577 (620)	Виктория голубая	»	814
Родамин С	Глицерин	570 (620)	Виктория голубая R	»	815
Пиронин В	Ацетон, полиметилметакрилат	576	1,1'-Диэтил-11-бром-2,2'-хинодикарбоцианин иодид	Ацетон	819 (800)
Акридин красный	Этанол	580 (615)	1,3,3,1',3',3'-Гексаметил-линдотрикарбоцианин иодид	Диметилсульфоксид	822
Родамин G	»	585	3,3'-Диэтилтиатрикарбоцианин иодид, или DTTC	Серная кислота	823
Родамин S	»	(586)	Метиленовый зеленый	Этанол	824,5
Пиронин G	Изоамиловый спирт	590 (600)	1,3,3,1',3',3'-Гексаметил-линдотрикарбоцианин иодид	Ацетон	826
Люцегенин	Вода и серная кислота	600	3,3'-Диэтил-2,2'-селенатрикарбоцианин иодид	Серная кислота	829
Эозин	Этанол	600	1,1'-Диэтил-11-бром-4,4'-хинодикарбоцианин иодид	Метанол	830
Сафранин-Т	»	610	3,3'-Диэтилтиатрикарбоцианин бромид	»	835
Изохинолин красный	»	620			
Фиолетовый красный	Изоамиловый спирт	620			
Родамин 3В	»	620 (615)			
3,3'-Диэтилоксадикарбоцианиниодид	Метанол	658			
Крезил фиолетовый	Толуол	(646—709)			
3,3'-Диэтил-2,2'-тиадикарбоцианин иодид	Ацетон	711			
3,3'-Диэтил-10-хлор-2,2'-(5,6,5',6'-дibenzo)-тиадикарбоцианин иодид	»	714			
3,3'-Диэтил-2,2'-(5,5'-диметил)-тиазолинотрикарбоцианин иодид	Глицерин	717			
3,3'-Диэтилокситрикарбоцианин иодид	Этанол	728,5			
3,3'-Диэтил-5,5'-диметокси-6,6'-бис (метилмеркапто)-10-метилтиадикарбоцианин бромид	»	733			

Органическое соединение	Растворитель	Длина волны генерации при лазерной (ламповой) накачке, нм	Органическое соединение	Растворитель	Длина волны генерации при лазерной (ламповой) накачке, нм
Метиленовый голубой	Серная кислота	835	3,3'-Диэтил-6,7,6',7'-дибензо-11-метилтиатрикарбодиазинин иодид	Этанол	856
3,3'-Диэтил-6,7,6',7'-дибензотиатрикарбодиазинин иодид	Этанол	838,5	3,3'-Диэтил-2,2'-(4,5,4',5'-дибензо) тиатрикарбодиазинин иодид	Ацетон	860
Толундин голубой	Серная кислота	848	Фталоцианин	Серная кислота	863
Тионин	»	850	1,1'-Диэтил-2-2'-хинотрикарбодиазинин иодид	Ацетон	898
3,3'-Диэтил-2,2'-(5,6,5',6'-тетраметокси)тиатрикарбодиазинин	Ацетон	853	1,1'-Диэтил-4,4'-хинотрикарбодиазинин иодид	»	1000
			Аналоги пентакарбодиазинина	Нитробензол	1095—1175

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Willett C. S. Handbook of Lasers. Ed. by R. J. Presley, Cleveland, Chemical Rubber Co., 1971, p. 183.
2. Moore C. E. Atomic Energy Levels, NBS-467, Washington, v. 1—3.
3. Bridges W. B., Chester A. N. См. [1], p. 242.
4. Silvast W. T., Klein M. B. "Appl. Phys. Lett.", 1970, v. 17, p. 400.
5. Pollack M. A. См. [1], p. 298.
6. Weber M. J. См. [1], p. 371.
7. Рябцев Н. Г. Материалы квантовой электроники. М., «Сов. радио», 1972.
8. Woodcock R. F. См. [1], p. 360.
9. Бужинский И. М. и др. «Докл. АН СССР», 1970, т. 190, с. 558.
10. Дианов Е. М. «Приборы и техника эксперим.», 1969, № 4, с. 169.
11. Атанов И. Г. и др. «Изв. АН СССР. Сер. неорг. материалы», 1974, т. 50, № 5, с. 921.
12. Pankove J. I. См. [1], p. 365.
13. Lempicki I. См. [1], p. 355.
14. Deutsch T. F. См. [1], p. 350.

ГЛАВА 34

ЭЛЕКТРО-, МАГНИТО- И ПЬЕЗООПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

34.1. ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ (ЭФФЕКТ ПОККЕЛЬСА)

Линейный электрооптический эффект (эффект Поккельса) заключается в изменении преломляющих свойств кристаллов под действием внешнего постоянного или переменного электрического поля (частота переменного электрического поля значительно меньше оптических частот).

Связь между изменениями поляризационных констант вещества $\Delta B_{ij} = \Delta (1/\epsilon)_{ij}$ (где ϵ — диэлектрическая проницаемость) и приложенным электрическим полем E_k дается электрооптическими коэффициентами r_{ijk} :

$$\Delta B_{ij} = r_{ijk} E_k,$$

где $i, j, k = 1, 2, 3$. Коэффициенты r_{ijk} образуют полярный тензор третьего ранга, называемый тензором линейного электрооптического эффекта. В сокращенной записи

$$\Delta B_l = r_{lk} E_k$$

$l = (ij)$ и в зависимости от ij индекс l пробегает значения от 1 до 6: 1 = (11), 2 = (22), 3 = (33), 4 = (23), 5 = (13), 6 = (12).

Ниже приведены тензоры электрооптических коэффициентов по сингониям [1] в зависимости от типа точечной симметрии кристаллов.

Триклинная $1 - C_1$:

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} \end{pmatrix} (18) \text{ элементов}$$

Моноклиная:

$$2 - C_2$$

$$m - C_s$$

$$\begin{pmatrix} 0 & r_{21} & 0 \\ 0 & r_{22} & 0 \\ 0 & r_{23} & 0 \\ r_{41} & 0 & r_{43} \\ 0 & r_{52} & 0 \\ r_{51} & 0 & r_{53} \end{pmatrix} (2 \parallel X_2) (8) \quad \begin{pmatrix} r_{11} & 0 & r_{13} \\ r_{21} & 0 & r_{23} \\ r_{31} & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{42} & 0 \\ r_{51} & 0 & r_{53} \\ 0 & r_{62} & 0 \end{pmatrix} (m \perp X_2) (10)$$

Орторомбическая:

222 — D_2

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{52} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{pmatrix} (3)$$

mm2 — C_{2v}

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{23} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{42} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (5)$$

Тетрагональная:

4 — C_4

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ r_{41} & r_{51} & 0 \\ r_{51} & -r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (4)$$

$\bar{4}$ — S_4

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -r_{13} \\ 0 & 0 & -r_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & -r_{51} & 0 \\ r_{51} & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{pmatrix} (4)$$

422 — D_4

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & -r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (1)$$

4mm — C_{4v}

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (3)$$

$\bar{4}2m$ — D_{2d}

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{pmatrix} (2 \parallel X_1) \quad (2)$$

Триклинная:

3 — C_3

$$\begin{pmatrix} r_{11} & -r_{22} & r_{13} \\ -r_{11} & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ r_{41} & r_{51} & 0 \\ r_{51} & -r_{41} & 0 \\ -r_{22} & -r_{11} & 0 \end{pmatrix} (6)$$

32 — D_3

$$\begin{pmatrix} r_{11} & 0 & 0 \\ -r_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & -r_{41} & 0 \\ 0 & -r_{11} & 0 \end{pmatrix} (2)$$

3m — C_{3v}

$$\begin{pmatrix} 0 & -r_{22} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{pmatrix} (4)$$

Гексагональная:

6 — C_6

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ r_{41} & r_{51} & 0 \\ r_{51} & -r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (4)$$

6 — C_{3h}

$$\begin{pmatrix} r_{11} & -r_{22} & 0 \\ -r_{11} & r_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -r_{22} & -r_{11} & 0 \end{pmatrix} (2)$$

622 — D_6

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & -r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (1)$$

6mm — C_{6v}

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (3)$$

$\bar{6}m2$ — D_{3h}

$$\begin{pmatrix} 0 & -r_{22} & 0 \\ 0 & r_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{pmatrix} (m \perp X_1) \quad (1)$$

Кубическая:

432 — 0

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (0)$$

23 и $\bar{4}3m$ — T и Td

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{41} \end{pmatrix} (1)$$

Значения электрооптических коэффициентов для различных типов кристаллов приведены в табл. 34.1—34.4. Если частоты электрического поля, при которых произведены измерения, намного выше или ниже частоты собственного акустического резонанса, то используются соответственно обозначения (S) и r_{ijk}^S или (T) и r_{ijk}^T . Погрешность измеренных значений r_{ijk} составляет ~15%. В ферромагнетиках и других материалах, имеющих фазовый переход, наблюдается сильная зависимость электрооптического коэффициента от температуры, если последняя близка к критической температуре T_K . Зависимость r_{ijk} от длины волны света в области прозрачности веществ, как правило, мала.

Одной из важных характеристик электрооптических кристаллов является полуволновое напряжение $U_{\lambda/2}$, т. е. напряжение, соответствующее набегу разности фаз, равной π , между двумя световыми волнами с взаимноперпендикулярными поляризациями. Эта величина может быть найдена из соотношения

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{n_{33}^3 - n_{13}^3} = \frac{\lambda}{n_{3c}^3},$$

где $r_c = r_{33} - (n_1^3/n_3^3)r_{13}$. В случае одноосных кристаллов ось z (или ось 3) — оптическая и свет распространяется в перпендикулярном к ней направлении.

Электрооптические свойства кристаллов типа KDP и ADP [1]

Симметрия $42m$ при температурах выше критической T_K .

Вещество	$T_K, ^\circ K$	$r_{63}, 10^{-12} \text{ м/в}$	$r_{41}, 10^{-12} \text{ м/в}$	ϵ_3	ϵ_1
KH_2PO_4 (KDP)	123	— (T) 9,37 (S) 8,15 $r_{63} < 0$	+8,6 $r_{41} < 0$ 8,8	(T) 21 (S) 21	42 44
KD_2PO_4 (DKDP)	222	(T) 26,4 (S) 24,0 $0,93 r_{63}^T$	—	(T) 50 (S) 48	58
KH_2AsO_4 (KDA)	97	(T) 10,9	12,5	(T) 21 (S) 19	54 53
KD_2AsO_4 (DKDA)	162	(T) 18,2	—	—	—
RbH_2PO_4 (RDP)	147	(T) 15,5 (S) 0,91 r_{63}^T	—	—	—
RbH_2AsO_4 (RDA)	110	(T) 13,0	—	(T) 27 (S) 24	41 39
RbD_2AsO_4 (DRDA)	178	(T) 21,4	—	—	—
CsH_2AsO_4 (CDA)	143	(T) 18,6	—	—	—
CsD_2AsO_4 (DCDA)	—	(T) 36,6	—	—	—
$NH_4H_2PO_4$ (ADP)	148*	(T) —8,5 (S) 4,1	23,1 $r_{41} < 0$	(T) 15 (S) 14	56 58
$ND_4D_2PO_4$ (DADP)	242*	(T) 11,9	—	—	—
$NH_4H_2AsO_4$ (ADA)	—	(T) 9,2	—	—	—

* Антиферроэлектрический переход.

Электрооптические свойства кристаллов типа ABO_3 [1]

Вещество ($T_K, ^\circ K$)	Симметрия	$r_{l\alpha}, 10^{-12} \text{ м/в}$	$r_{lk}, 10^{-12} \text{ м/в}$	$\lambda, \text{ мкм}$	ϵ_i
$LiNbO_3$ (1470)	$3m$	(T) $r_{33} = +32,2$ (T) $r_{13} = +10$ (T) $r_c = 18$ (T) $r_c = 17$ (T) $r_c = 16$ (S) $r_{33} = +30,8$ (S) $r_{13} = +8,6$ (S) $r_{33} = 28$ (S) $r_{13} = 6,5$	(T) $r_{22} = 6,8$ (T) $r_{51} = 32$ (T) $r_{22} = 5,7$ (T) $r_{22} = 3,1$ (S) $r_{22} = 3,4$ (S) $r_{51} = +28$ (S) $r_{22} = 3,1$ (S) $r_{51} = 23$	0,633 0,633 1,15 3,39 0,633 0,633 3,39	(T) $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 78$ (T) $\epsilon_3 = 32$ (S) $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 43$ (S) $\epsilon_3 = 28$
$LiTaO_3$ (890)	$3m$	(T) $r_c = 22$ (S) $r_{33} = 30,3$ (S) $r_{13} = 7$ (S) $r_{33} = 27$ (S) $r_{13} = 4,5$	(S) $r_{51} = 20$ (S) $r_{22} \approx 1$ (S) $r_{51} = 15$ (S) $r_{22} \approx 0,3$	0,633 0,633 0,633 3,39 3,39	(T) $\epsilon_2 = \epsilon_1 = 51$ (T) $\epsilon_3 = 45$ (S) $\epsilon_2 = \epsilon_1 = 41$ (S) $\epsilon_3 = 43$
$BaTiO_3$ (395)	$4mm$	(T) $r_c = 108$ (S) $r_c = 23$ (S) $r_c = 19$ (S) $r_{33} = 28$ (S) $r_{13} = 8$	(T) $r_{51} = 1640$ (S) $r_{51} = 820$	0,546 0,546 0,633 0,633 0,633	(T) $\epsilon_1 = \epsilon_3 = 3600$ (T) $\epsilon_3 = 135$ (S) $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 2300$ (S) $\epsilon_3 = 60$
$K_3Li_2Nb_6O_{15}$ (693)	$4mm$	(T) $r_{33} = 78$ (T) $r_{13} = 8,9$		0,633 0,633	(T) $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 309$ (T) $\epsilon_3 = 100$

Вещество (T_K , °K)	Симметрия	r_{Lz} , 10^{-12} м/в	r_{Lk} , 10^{-12} м/в	λ , мкм	ϵ_i
$Sr_{0,75}Ba_{0,25}Nb_2O_6$ (~330)	4mm	(T) $r_c = 1410$ (T) $r_{33} = 1340$ (T) $r_{13} = 67$ (S) $r_c = 1070$	(T) $r_{51} \parallel 42$	0,633 0,633 0,633 0,633	$\epsilon_3 = 3400$ (15 МГц)
$Sr_{0,5}Ba_{0,5}Nb_2O_6$	4mm	(T) $r_c = 218$ (15 МГц) $r_c = 96$		0,633 0,633	$\epsilon_3 = 450$ (15 МГц)
$Sr_{0,25}Ba_{0,75}Nb_2O_6$ (~520)	4mm	(15 МГц) $r_c = 45$		0,633	$\epsilon_3 = 118$ (15 МГц)
$KTa_xNb_{1-x}O_3$ (~330)	4mm	(T) $r_c = 450$	(T) $r_{51} = + 50$	0,633	
$PbTiO_3$ (765)	4mm	(S) $r_{33} = 5,9$ (S) $r_{13} = 13,8$		0,633 0,633	(S) $\epsilon_3 = 31$
$KSr_2Nb_6O_{15}$ (433)	4mm или 4	(T) $r_c = 130$		0,633	(T) $\epsilon_3 = 1000$ (T) $\epsilon_1 = 1200$
$LiIO_3$ (пирозлектр.)	6	(S) $r_{33} = + 6,4$ (S) $r_{13} = + 4,1$	(S) $r_{41} = 1,4$ (S) $r_{51} = + 3,3$	0,633 0,633	(T) $\epsilon_3 = 554$ (T) $\epsilon_1 = 65$ (S) $\epsilon_3 = 6,5$ (S) $\epsilon_1 = 8$
$Ba_2NaNb_5O_{15}$ (833)	m2	(T) $r_c = 34$ (T) $r_{33} = 48$ (T) $r_{13} = 15$ (T) $r_{23} = 13$ (S) $r_{33} = + 29$ (S) $r_{23} = 8$ (S) $r_{13} = 7$	(T) $r_{42} = 92$ (T) $r_{51} = 90$ (S) $r_{42} = 75$ (S) $r_{51} = 88$	0,633 0,633 0,633 0,633 0,633 0,633 0,633	(T) $\epsilon_1 = 235$ (T) $\epsilon_2 = 247$ (T) $\epsilon_3 = 51$ (S) $\epsilon_1 = 222$ (S) $\epsilon_2 = 227$ (S) $\epsilon_3 = 32$

Таблица 34.3

Электрооптические свойства кристаллов типа АВ [1]

Вещество	Симметрия	r_{Lk} , 10^{-12} м/в	λ , мкм	ϵ_i
CuCl	$\bar{4}3m$	(T) $r_{41} = 3,6$ (T) $r_{41} = 3,2$ (S) $r_{41} = + 2,35$ (S) $r_{41} = + 2,20$	0,633 10,6 0,633 3,39	(S) $\epsilon = 7,5$
CuBr	$\bar{4}3m$	(T) $r_{41} = 0,85$	0,525	
ZnO	6mm	(S) $r_{33} = + 2,6$ (S) $r_{13} = - 1,4$ (S) $r_{33} = + 1,9$ (S) $r_{13} = + 0,96$	0,633 0,633 3,39 3,39	(S) $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 8,15$ $\approx \epsilon_3$
ZnS	$\bar{4}3m$	(T) $r_{41} = 1,2$ (T) $r_{41} = 2,1$ (S) $r_{41} = 1,6$ (S) $r_{41} = 1,4$	0,4 0,65 0,633 3,39	(T) $\epsilon = 16$ (S) $\epsilon = 12,5$ (T, S) $\epsilon = 8,3$

Вещество	Симметрия	$r_{ik}, 10^{-12} \text{ м/в}$	$\lambda, \text{ мкм}$	ϵ_i
CdS	6mm	(T) $r_c = 4$ (T) $r_{61} = 3,7$ (T) $r_c = 5,5$ (S) $r_{33} = 2,4$ (S) $r_{13} = 1,1$	0,589 0,589 10,6 0,633 0,633	(T) $\epsilon_3 = 10,33$ (T) $\epsilon_1 = 9,35$ (S) $\epsilon_1 = 9,02$ (S) $\epsilon_3 = 9,53$
CdSe	6mm	(S) $r_{33} = 4,3$ (S) $r_{13} = 1,8$	3,39 3,39	(T) $\epsilon_3 = 10,65$ (T) $\epsilon_1 = 9,70$ (S) $\epsilon_1 = 9,33$ (S) $\epsilon_3 = 10,20$
CdTe	$\overline{43m}$	(T) $r_{41} = 6,8$ (T) $r_{41} = 6,8$ (T) $r_{41} = 5,5$ (T) $r_{61} = 5,0$	3,39 10,6 23,35 27,95	(S) $\epsilon = 9,4$
HgS	32	(S) $r_{11} = 3,1$ (S) $r_{41} = 1,4$ (S) $r_{11} = 4,2$ (S) $r_{41} = 2,4$	0,633 0,633 3,39 3,39	
ZnS	6mm	(S) $r_{33} = 1,8$ (S) $r_{33} = 1,7$ (S) $r_{13} = 0,9$	0,633 3,39 0,633	(T) $\epsilon_1 = \epsilon_3 = 8,7$ (S) $\epsilon_1 = 8,7$
ZnSe	$\overline{43} m$	(T) $r_{41} = 2,0$ (S) $r_{41} = 2,0$ (T) $r_{41} = 2,2$	0,546 0,633 10,6	(T) $\epsilon = 9,1$ (S) $\epsilon = 9,1$
ZnTe	$\overline{43m}$	(T) $r_{41} = 4,45 \div 3,95$ (T) $r_{41} = 1,4$ (S) $r_{41} = 4,3$ (S) $r_{41} = 3,2$	0,59; 0,69 10,6 0,633 3,39	(T) $\epsilon = 10,1$ (S) $\epsilon = 10,1$
GaP	$\overline{43m}$	(S) $r_{41} = -1,07 \div (-0,97)$	0,56; 3,39	(S) $\epsilon = 12$ (S) $\epsilon = 10$
GaAs	$\overline{43m}$	(S) $r_{41} = 1,2$ (S) $r_{41} = -1,5$ (S + T) $r_{41} = 1,2 \div 1,6$ (T) $r_{41} = 1,0 \div 1,2$ (T) $r_{41} = 1,6$ (S) $r_{41} = 1,5$	0,9 1,08 3,39 1,0; 3,0 4,0; 12,0 10,6 10,6	(S) $\epsilon = 13,2$ (S) $\epsilon = 12,3$ (T) $\epsilon = 12,5$

Электрооптические свойства кристаллов различных типов [1]

Вещество	Симметрия	$r_{ijk}, 10^{-12} \text{ м/в}$	$\lambda, \text{ мкм}$	$n_i (\lambda, \text{ мкм})$
$\text{Bi}_4(\text{GeO}_4)_3$	$\overline{43m}$	(T) $r_{41} = 1,03$	0,45—0,62	$n_0 = 2,07$
$(\text{CH}_3)_6\text{N}_4$ (HMT-гексаметилентетрамин)	$43m$	(T) $r_{41} = 0,71-0,8$ (T) $r_{41} = 0,78$ (S) $r_{41} < 0,14$	0,546 0,633 0,633	$n_0 = 1,591 (0,589)$ $n_0 = 1,594 (0,633)$
Гайнит (минерал)	$\overline{43m}$	(T) $r_{41} < 0,04$	0,633	$n_0 = 1,496$
$\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$	23	(T) $r_{41} = 0,40$	0,546	$n_0 = 1,535 (0,589)$
$(\text{NH}_4)_3\text{Cd}_2(\text{SO}_4)_3$	23	(T) $r_{41} = 0,70$	0,546	$n_0 = 1,606 (0,589)$
$(\text{NH}_4)_2\text{Mn}_2(\text{SO}_4)_3$	23	(T) $r_{41} = 0,53$	0,546	$n_0 = 1,57 (0,589)$
$\text{Ti}_2\text{Cd}_2(\text{SO}_4)_3$	23	(T) $r_{41} = 0,37$	0,546	$n_0 = 1,730 (0,589)$
$\text{K}_2\text{Mn}_2(\text{SO}_4)_3$	23	(T) $r_{41} = 2,0$	0,453—0,642	1,62 (0,45—0,65)
$\text{Rb}_2\text{Mn}_2(\text{SO}_4)_3$	23	(T) $r_{41} = 1,9$	0,453—0,642	1,60 (0,45—0,65)
$\text{Ti}_2\text{Mn}_2(\text{SO}_4)_3$	23	(T) $r_{41} = 2,1$	0,453—0,642	1,80 (0,45—0,65)
$\text{K}_2\text{Ni}_2(\text{SO}_4)_3$	23	(T) $r_{41} = 1,0$	0,453—0,642	1,70 (0,45—0,65)
NaClO_3	23	(T) $r_{41} = 0,4$	0,589	$n_0 = 1,515$
$\text{Na}_3\text{SbS}_4 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	23	(T) $n_1^3 r_{41} = 5,66$ (T) $n_1^3 r_{41} = 5,62$	0,42 1,08	
Уранилацетат натрия	23	(T) $r_{41} = 0,87$	0,546	$n_0 = 1,507 (0,546)$
LiKSO_4	6	(T) $r_c = 1,6$	0,546	$n_3 \approx n_1 = n_2 = 1,474 (0,546)$
LiNaSO_4	3m	(T) $r_{22} < 0,02$	0,546	$\begin{cases} n_3 = 1,495 \\ n_1 = n_2 = 1,490 \end{cases}$
Турмалин	3m	(T) $r_{22} = 0,3$ (S) $r_{33} = r_{13} = 1,7$	0,589 0,633	$\begin{cases} n_3 = 1,65 \\ n_1 = n_2 = 1,63 \end{cases}$
$\text{Na}_3\text{Li}(\text{CrO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	3m	(T) $r_{22} = 0,92$ (T) $r_{22} = 0,82$ (T) $r_{22} = 0,77$	0,50 0,52 0,60	$n_1 = n_2 = 1,643 (0,50)$ $n_1 = n_2 = 1,635 (0,52)$ $n_1 = n_2 = 1,612 (0,60)$
Ag_3AsS_3 (прустит)*	3m	(S) $(n_1^3 r_{13} - n_3^3 r_{33}) = 70$ (S) $n_1^3 r_{22} = 29$	0,633 0,633	$n_1 = 3,02 (0,633)$ $n_3 = 2,74 (0,633)$
$\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_6$	32	(T) $r_{11} = 0,26$	0,546	$\begin{cases} n_3 = 1,1518 \\ n_1 = n_2 = 1,456 \end{cases}$
$\text{Cs}_5\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$	32	(T) $r_{11} = 1,0$	0,546	$\begin{cases} n_3 = 1,546 \\ n_1 = n_2 = 1,564 \end{cases}$
$\text{SrS}_2\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	32	(T) $r_{11} = 0,1$	0,546	$\begin{cases} n_3 = 1,528 \\ n_1 = n_2 = 1,532 \end{cases}$
Se^{2+}	32	(S) $n_1^3 r_{11} = 89$ (S) $_{11} \sim 2,5$	1,15 10,6	$n_1 = 2,737 (1,15)$ $n_3 = 3,573$ $n_1 = 2,64 (10,6)$ $n_3 = 3,41$
SiO_2 (кварц)*	32	(T) $r_{11} = -0,47$ (T) $r_{11} = 0,20$ (S) $r_{11} = 0,23$ (S) $r_{11} = 0,29$ (S) $r_{31} = 0,174$ (T) $r_{31} = 0,1$	0,409—0,605 0,633 0,633 0,633 0,633 0,546	$n_3 = 1,555 (0,546)$ $n_1 = n_2 = 1,546 (0,546)$
$(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6)_2 \cdot \text{NaBr} \cdot \text{H}_2\text{O}$	32	(T) $r_{31} = 0,1$	0,546	$n_3 = 1,560 (0,546)$
AgGaS_2	$\overline{42m}$	(T) $r_{63} = 3,0$ (T) $r_{41} = 4,0$	0,633 0,633	$n_1 = n_2 = 2,55 (0,633)$ $n_3 = 2,50$
$\text{Gd}_2 (\text{MoO}_4)_3$	$\overline{42m}$	(T) $n_1^3 r_{63} = 17 (450^\circ\text{K})$	0,633	$n_1 = n_2 = 1,528$ $n_1 \approx n_2 = 1,848 (0,633)$
CdGa_2S_4	$\frac{mm2}{4}$	(T) $n_1^3 r_{13} - n_3^3 r_{33} = 17,5 (300^\circ\text{K})$ (T) $r_{13} = 0,37$ (T) $r_{63} = 3,5$	0,633 0,50 0,50	$n_3 = 1,901 (0,633)$ $\begin{cases} n_1 = n_2 = 2,3 (0,50) \end{cases}$
$(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	222	(T) $r_{41} = 230$ (T) $r_{62} = 330$ (T) $r_{63} = 250$ (T) $r < 250$ (S) $r_{63} \approx 2$	0,633 0,633 0,633 0,633 0,633	$n_1 = 1,437 (0,65)$ $n_2 = 1,547$ $n_3 = 1,590$

Вещество	Симметрия	$r_{ijk}, 10^{-12} \text{ м/с}$	$\lambda, \text{ мкм}$	$n_i (\lambda, \text{ мкм})$
NaNO_2^*	<i>mm2</i>	$(T) r_{22} - \left(\frac{n_3}{n_2}\right)^3 r_{32} = 4,1$ $(T) r_{32} - \left(\frac{n_1}{n_3}\right)^3 r_{12} = 4,2$ $(T) r_{22} - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 r_{12} = 0,6$ $(T) r_{43} = -1,9$ $(T) r_{61} = -3,0$	0,546	$n_1 = 1,347 (0,546)$ $n_2 = 1,415$ $n_3 = 1,661$
$\text{C} (\text{CH}_2\text{OH})_4$	2	$(T) r_{52} = 1,45$ $(T) r_{12} - r_{32} = 0,7$	0,46—0,70 0,46—0,70	$n_1 = 1,528$ $n_2 \approx n_3 = 1,56$
$\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$	2	$(T) \left r_{22} - \frac{n_1^3}{n_2^3} r_{12} \right = 12$ $(T) \left r_{22} - \frac{n_3^3}{n_2^3} r_{32} \right = 14$ $(S) \left r_{22} - \frac{n_3^3}{n_2^3} r_{32} \right = 13$ $(S) r_{12} = 6,7$ $(S) r_{22} = 25,5$ $(S) r_{32} = 6,4$ $(S) r_{41} = 2,7$ $(S) r_{52} < 0,6$ $(S) r_{63} = 0,9$	0,63 0,63 0,63 0,63	$n_1 = 1,97$ $n_2 = 2,16$ $n_3 = 2,17$

* Прозрачен от 0,6 до 13 мкм; $\epsilon_1 \approx \epsilon_2 = 20$; $\rho = 10^5 \text{ ом}\cdot\text{см}$.

** Граница прозрачности $\sim 8 \text{ мкм}$; $\epsilon_1 \approx 8$.

** $r_{11} < 0$ и $r_{41} > 0$ в левовращающем кварце.

** (S) $\epsilon_3 = 14$, (S) $\epsilon_1 = 10$.

** $T_K = 432^\circ\text{K}$, $\epsilon_3 = 8$.

** x_2 принято полярной осью, переход в *mm2* при 423°K ; (S) $\epsilon_1 = 5$, $\epsilon_2 = 4$, $\epsilon_3 = 8$.

34.2 ЛИНЕЙНЫЙ МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ (ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ)

Поворот плоскости поляризации света, распространяющегося в среде, находящейся во внешнем магнитном поле, называется линейным магнитооптическим эффектом или эффектом Фарадея. В пара- и диамагнитных материалах угол поворота плоскости поляризации ϕ_F дается соотношением

$$\phi_F = VHI \cos \gamma, \quad (1)$$

где V — постоянная Верде, зависящая от природы вещества, частоты света и температуры; H — напря-

женность приложенного магнитного поля; l — длина пути луча в веществе; γ — угол между направлением приложенного поля и направлением распространения луча.

В ферромагнитных материалах магнитное поле в выражении для ϕ_F заменяется на намагниченность M , а постоянная Верде на постоянную Кундта K . В таблицах обычно приводится характерное для ферромагнетиков значение вращения при насыщенной намагниченности M_s , определяемое как удельное фарадеевское вращение плоскости поляризации для света, распространяющегося вдоль M_s , т. е.

$$F = KM_s \quad (2)$$

При рассмотрении магнитооптических характеристик веществ необходимо учитывать ослабление излучения при распространении его во вращающей среде. Для характеристики «качества» различных магнитоактивных сред служит величина $2F/\alpha$, где α — коэффициент ослабления или поглощения в законе $I = I_0 \exp(-\alpha l)$. К соотношениям (1) и (2) применимо обычное правило правой руки. Так, положительные Φ_F и F соответствуют случаю, когда свет распространяется вдоль направления магнитного поля и плоскость поляризации вращается по часовой стрелке.

В табл. 34.5—34.7 — приняты обозначения:

Температура Кюри	T_K
Температура фазового перехода	T_p
Температура Нееля	T_N
Температура компенсации	T_{co}
Индукция насыщения при 0°К, гс	$4\pi M_s$
Удельное фарадеевское вращение, град/см	F
Коэффициент поглощения, см ⁻¹	α
Характеристики качества, град	$2F/\alpha$
Длина волны излучения, нм	λ
Объемноцентрированный куб	о.ц.к.
Гексагональная плотная упаковка	г.п.у.
Гранецентрированный куб	г.ц.к.

Таблица 34.5

Характеристики ферромагнитных, ферримагнитных и антиферромагнитных веществ [2]

Вещество	Структура или состав	Критическая температура, °К	$4\pi M_s$, гс	F , $10^5 \frac{\text{град}}{\text{см}}$	α , 10^5 см^{-1}	$2F/\alpha$, град	T , °К	λ , нм
Металлы переходной группы								
Fe	о.ц.к.	$T_K = 1043$	21 800	3,5 5,1 4,4 6,5 7 7	7,6 3,2 6,5 5 4,2 3,5	0,92 3,1 1,4 2,6 3,3 4,0	300 300 300 300 300 300	546 1000 500 1000 1500 2000
Co	г.п.у.	$T_K = 1390$	18 200	3,6 2,9 5,5 5,5 4,8	8,5 — 6,1 4,5 3,6	0,85 — 1,8 2,4 2,7	300 300 300 300 300	546 500 1000 1500 2000
Ni	г.ц.к.	$T_K = 683$	6 400	0,99 7,2 0,8 2,6 1,5 1	8,0 4,2 — 5,8 4,8 4,1	0,25 3,4 — 0,9 0,6 0,25	300 300 300 300 300 300	546 4000 500 1000 1500 2000
Ni* (монокристалл)				0,79 0,88 0,97	— — —	— — —	300 300 300	546 546 546
Бинарные соединения и сплавы								
Пермаллой	г.ц.к. Ni : Fe % 82 : 18	$T_K = 803$	10 700	1,2	6	0,4	300	500
Cr Te	NiAs	$T_K = 334$	1 015	0,5 0,4 0,4	2,0 1,2 0,6	0,5 0,7 1,3	300 300 300	550 900 2500
MnAs	NiAs	$T_K = 313$		0,44 0,49 0,59 0,78 0,62	5,0 4,9 4,6 4,5 4,4	0,174 0,200 0,26 0,34 0,28	300 300 200 300 300	500 600 700 800 900

* Направление световой волны соответственно вдоль (100), (110) и (111).

Вещество	Структура или состав	Критическая °К	$4\pi M_s$, эс	F , $10^4 \frac{\text{град}}{\text{см}}$	α , 10^3 см^{-1}	$2F/\alpha$, град	T , °К	λ , нм
MnBi	NiAs	$T_K = 639$	7 700 (7 500 при 300 °К)	4,2 5,0 7,0 7,7 7,6 7,5 7,4	6,1 5,8 5,1 4,5 4,3 4,2 4,1	1,4 1,7 2,8 3,4 3,5 3,6 3,6	300 300 300 300 300 300 300	450 500 600 700 800 900 1000
		$T_K = 453$	(5500 при 300 °К)	3,2 3,3 3,3 3,3 3,2 3,2	6,1 5,8 5,1 4,7 4,5 4,4	1,0 1,1 1,3 1,4 1,4 1,4	300 300 300 300 300 300	450 500 600 700 800 900 1000
FeRh	—	$T_p = 333$	—	0,9	3,3	0,56	348	700
Ni + Fe	100 : 0		6 000	1,2	7,05	0,34	300	632,8
	90 : 10		8 400	1,6	7,14	0,45	300	632,8
	80 : 20		10 800	2,2	7,10	0,62	300	632,8
	70 : 30		12 900	2,7	7,0	0,77	300	632,8
	60 : 40		14 900	2,9	7,54	0,77	300	632,8
	50 : 50		16 000	2,8	8,13	0,69	300	632,8
	40 : 60		14 400	2,2	8,17	0,54	300	632,8
	30 : 70		8 000		8,13	—	300	632,8
	20 : 80		19 400	3,3	8,1	0,81	300	632,8
	10 : 90		20 800	3,6	8,13	0,88	300	632,8
	0 : 100		21 600	3,5	8,13	0,86	300	632,8
	35 : 65		12 400	2,1	7,7	0,55	300	400—700
Вещество	Структура или состав	Критическая температура, °К	$4\pi M_s$, эс	F , $\frac{\text{град}}{\text{см}}$	α , см^{-1}	$2F/\alpha$, град	T , °К	λ , нм
Ферриты								
$\text{Li}_{0,5} \text{Fe}_{2,5} \text{O}_4$	—	—	—	—440 —190 +10 +85 +110 +125 +135	150 135 85 60 44 44 80	6 3 0,2 3 5 6 3	300 300 300 300 300 300 300	1500 2000 3000 4000 5000 6000 7000
MgFe_2O_4	—	—	—	—60 —40 0 +30 +35 +50	100 40 12 4 6 13	1 2 0 15 11 8	300 300 300 300 300 300	2500 3000 4000 5000 6000 7000
CoFe_2O_4	Шпинель	$T_N = 793$	4930	$2,75 \cdot 10^4$ $3,8 \cdot 10^4$ $3,6 \cdot 10^4$ $1,3 \cdot 10^4$ $-2,5 \cdot 10^4$	$12 \cdot 10^4$ $14 \cdot 10^4$ $17 \cdot 10^4$ $13 \cdot 10^4$ $6 \cdot 10^4$	0,5 0,5 0,4 0,2 0,8	300 300 300 300 300	286 330 400 500 660
NiFeO_4	Шпинель	$T_N = 858$	3350	$2,0 \cdot 10^4$ $2,4 \cdot 10^4$ $-0,75 \cdot 10^4$ $-1,0 \cdot 10^4$ $+0,12 \cdot 10^4$ —120 +40 +75 +110 +110	$5,9 \cdot 10^4$ $7,4 \cdot 10^4$ $16 \cdot 10^4$ 10^6 10^4 38 32 15 15 32	0,7 0,7 0,09 0,2 0,2 6 2,5 10 15 7	300 300 300 300 300 300 300 300 300 300	286 330 400 500 660 1500 2000 3000 4000 5000

Вещество	Структура или состав	Критическая температура, °K	$4\pi M_s$, гс	F , $\frac{\text{град}}{\text{см}}$	α , см^{-1}	$2F/\alpha$, град	T , °K	λ , мкм
YIG	Гранат	$T_N = 560$	2500	240 2400 1750 1250 800 900 750 175	0,069 1500 1350 1400 1150 670 450 < 0,06	$7 \cdot 10^3$ 3,2 2,6 1,8 1,4 2,7 3,3 > $3 \cdot 10^3$	300 300 300 300 300 300 300 300	1200 555 588 625 667 715 770 5000—1500
BaFe ₁₂ O ₁₉	Гексагональная	—	—	—50 +75 +130	—38 20 13	3 7,5 20	300 300 300	2000 3000 4000
BaFe ₁₂ O ₁₉	Гексагональная	—	—	+150 +160 +165	20 20 22	15 16 15	300 300 300	5000 6000 7000
Ba ₂ Zn ₂ Fe ₁₂ O ₁₉	Гексагональная	—	—	+90 +80 +75 +70	120 70 65 85	1,5 2 2 2	300 300 300 300	5000 6000 7000 8000
GdIG	Гранат	$T_N = 564$ $T_{co} = 286$	7300	—2000 —1050 —450 —300 —220 —80	6000 900 400 100 230 70	0,6 2,3 2,3 6 1,9 2,3	300 300 300 300 300 300	500 600 700 800 900 1000
Фториды	—	$T_K = 365$	40 (300°K)	670 415 180	14 8,2 4,4	95 101 82	300 300 300	349 404 522,5
Rb Ni _{0,75} Co _{0,25} F ₃ *	Перовскит	$T_N = 109$	—	180	9	40	77	600
RbFeF ₃ *	Перовскит	$T_p = 102$	—	3400 1600 950 620 420 300	7 3 4,6 1,5 1,2 2,5	900 1100 410 830 700 240	82 82 82 82 82 82	300 400 500 600 700 800
RbNiF ₃ ^{2*}	Перовскит	$T_N = 220$	1250	360 210 70 — 70 310 100 75	35 12 10 30 70 60 25	20 35 14 5 9 3 6	77 77 77 77 77 77 77	450 500 600 700 800 900 1000
Теллуриды	—	—	—	—	—	—	—	—
CeCl ₃	BiI ₃	$T_K = 16,8$	3880	2000 — 500 —1000	200 300 70	20 3 30	1,5 1,5 1,5	410 450 590

* Имеется сильное естественное двулучепреломление.

** Измерено вдоль оси «с».

Вещество	Структура или состав	Критическая температура, °K	$4\pi M_S$, эс	F , $\frac{\text{град}}{\text{см}}$	α , см^{-1}	$2 F/\alpha$, град	T , °K	λ , нм	
CrBr ₃	BiI ₃	$T_K = 32,5$	3390	$3 \cdot 10^5$ $1,6 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^3$ $1,4 \cdot 10^4$	200 23	1,5	478 500	
CrI ₃	BiI ₃	$T_K = 68$	2690	$1,1 \cdot 10^5$ $0,8 \cdot 10^5$	$6,3 \cdot 10^3$ $3 \cdot 10^3$	35 53	1,5 1,5	970 1000	
Бораты FeBO ₃ ^{2*}	Кальцит	$T_K = 348$	115 (300°K)	3200	140	45	300	500	
				2300	40	115	300	525	
				1100	100	22	300	600	
				450	38	24	300	700	
Халькогениды									
EuO	NaCl	$T_c = 69$	23 700	$-1,0 \cdot 10^5$ $3,2 \cdot 10^5$ $5 \cdot 10^5$ $3,6 \cdot 10^5$ $0,5 \cdot 10^5$ $3 \cdot 10^4$ 660	$0,5 \cdot 10^4$ $7,5 \cdot 10^4$ $9,7 \cdot 10^4$ $9,7 \cdot 10^4$ $7,8 \cdot 10^4$ $\geq 0,5$ $\geq 1,0$	40 8,5 10 7,5 1,3 $\sim 10^5$ ~ 1300	5 5 5 6 5 20 20	1100 800 700 600 500 2500 10600	
EuS	NaCl	$T_c = 16,3$	—	$-1,6 \cdot 10^5$ $-9,6 \cdot 10^5$ $5,5 \cdot 10^5$ $5,1 \cdot 10^5$	~ 0 $3,3 \cdot 10^4$ $1,2 \cdot 10^5$ $1,0 \cdot 10^5$	— 58 92 10	6 6 6 6	825 690 563 495	
EuSe	NaCl	$T_c = 7$	13 200	$1,45 \cdot 10^5$ $1,17 \cdot 10^5$ $0,95 \cdot 10^5$	80 70 60	3600 3340 3170	4,2 4,2 4,2	750 775 800	
Вещество	πM_S , эс	F (град/см) для η (нм)						α , см^{-1} для $\lambda = 1250$ нм	
		600	800	1000	1200	1400	1600		
Ортоферриты*									
EuFeO ₃	83	} «с»	8000	2200	1000	800	700	600	~38
GdFeO ₃	94								~10
TbFeO ₃	137								~29
DyFeO ₃	128								~40
HoFeO ₃	91								~10
ErFeO ₃	81								~15
TmFeO ₃	140								~5
YbFeO ₃	143								12,5
LuFeO ₃	119	} «а»	3400	700	400	300	200	150	~5
SmFeO ₃	84								~50
YFeO ₃	105								~10
LaFeO ₃	83								~10
PrFeO ₃	71								~35
NdFeO ₃	62								~10

* Все ортоферриты обладают сильным естественным двулучепреломлением.

Парамагнитные вещества [2]

Кристалл	Ион	Концентрация, %	$T, ^\circ\text{K}$	$\lambda, \text{нм}$	$V, \frac{\text{мин}}{\text{э}\cdot\text{см}}$	$\alpha, \text{см}^{-1}$	V/α
Ионы редких земель в кристаллах							
CaF_2	Eu^{2+}	3	4,2	430	29	11,5	2,5
			4,2	440	22	1,8	12
CaF_2	Nd^{3+}	2,9	4,2	426,4	0,19	5	0,04
EuF_2	Eu^{2+}	—	300	450	4,5	20	0,2
			300	500	2,6	7	0,4
			300	550	1,6	6	0,3
			300	600	1,1	5,5	0,2
			300	650	0,8	5	0,16

Вещество	T, °K	λ, нм	V, $\frac{\text{мин}}{\text{э}\cdot\text{см}}$	λ нм, при, α	
				10 ⁴ см ⁻¹	1 см ⁻¹
Перовскиты (оксиды)					
SrTiO ₃	298	413	0,78	368	413
		496	0,31	—	—
		620	0,14	—	—
		826	0,066	—	—
BaTaO ₃	403	427	0,95	380	446
		496	0,38	—	—
		620	0,18	—	—
		826	0,072	—	—
KTaO ₃	296	352	0,44	327	370
		413	0,19	—	—
		496	0,096	—	—
		620	0,051	—	—
		826	0,022	—	—

Вещество	T, °K	V, мин/(э · см), для λ, нм							
		405	450	480	520	546	578	635	670
Редкоземельные гранаты									
TbAlG*	300	—2,226	—1,565	—1,290	—1,039	—0,912	—0,787	— 0,620	— 0,542
	77	—	—	—	—3,425	—3,051	—2,603	— 2,008	— 1,815
	4,2	—	—102,16	— 83,45	— 64,80	—58,35	—53,77	—48,39	—45,15
	1,45	—	—200,95	—172,52	—139,28	—125,07	—111,27	—97,47	—93,42
DyAlG	300	—1,241	—0,942	—0,803	—0,667	—0,592	—0,518	—0,411	—0,359
HoAlG	300	—0,709	—0,320	—0,260	—0,335	—0,304	—0,299	—	—0,206
ErAlG	300	—0,189	—0,240	—0,154	—0,162	—0,157	—0,145	—0 105	—0,089
TmAlG	300	+0,151	+0,103	+0,093	0,076	+0,069	+0,059	+0,048	—
YbAlG	298	0,287	0,215	0,186	0,140	0,133	0,116	0,094	—
	77	0,718	0,540	0,481	0,393	0,342	0,302	0,239	—

* $\alpha \approx 02, -0,6 \text{ см}^{-1}$ при $T = 300^\circ\text{K}$.

Магнитооптические свойства стекол [2]

Стекло	Массовое содержание, %				V , мин/(э·см), при $T=300^\circ\text{K}$ для λ , нм									
	Eu ²⁺	EuO	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	406	435	450	500	550	600	650	700	750	800
Европиевое	12,9	14,4	15,3	70,2	−0,633	−0,341	−0,282	−0,162	−0,104	−0,076	−0,061	−0,049	−0,042	−0,032
	14,7	16,5	11,2	72,0	−0,748	−0,400	−0,327	−0,199	−0,131	−0,090	−0,070	−0,055	−0,046	−0,038
	17,9	20,0	13,4	66,2	−1,18	−0,675	−0,525	−0,298	−0,208	−0,149	−0,113	−0,091	−0,072	−0,060
	26,7	29,9	11,0	60,0	—	−1,27	−0,980	−0,523	−0,367	−0,258	−0,191	−0,158	−0,129	−0,110
	30,5	34,2	14,8	50,7	—	—	−2,55	−1,23	−0,721	−0,478	−0,366	−0,268	−0,225	−0,174
Стекло	Состав*				V , мин/(э·см), при $T=300^\circ\text{K}$ для λ , нм									
	R	x		405	436	480	500	520	546	578	600	635	670	
Боратное с ионами ред- коземельных элемен- тов	La	3,04		0,043	0,036	0,029	0,026	0,023	0,022	0,019	0,018	0,016	0,014	
	Pr—La	5,44		−0,380	−0,307	−0,230	−0,220	−0,211	−0,178	−0,153	−0,146	−0,128	−0,110	
	Nd—La	5,41		−0,180	−0,147	−0,120	−0,111	−0,096	−0,094	−0,100	−0,059	−0,056	−0,046	
	Sm—La	4,97		0,032	0,030	0,025	0,024	0,022	0,019	0,017	0,016	0,014	0,010	
	Eu—La	4,69		−0,081	−0,060	−0,038	−0,033	−0,029	−0,024	−0,019	−0,016	−0,014	−0,012	
	Gd—La	4,71		0,032	0,026	0,024	0,022	0,021	0,020	0,018	0,017	0,015	0,013	
	Tb—La	4,73		−0,512	−0,419	−0,319	−0,288	−0,262	−0,234	−0,205	−0,186	−0,167	−0,142	
	Dy—La	4,88		−0,436	−0,361	−0,239	−0,273	−0,246	−0,220	−0,193	−0,177	−0,159	−0,138	
	Ho—La	4,36		−0,269	−0,252	−0,123	−0,131	−0,112	−0,128	−0,104	−0,096	—	−0,074	
	Er—La	4,50		−0,093	−0,078	−0,068	−0,082	—	−0,045	−0,042	−0,040	−0,035	−0,034	
	Tm—La	4,75		0,060	0,046	0,039	0,034	0,031	0,026	0,023	0,021	0,018	0,016	
	Yb—La	8,58		0,115	0,094	0,073	0,066	0,060	0,054	0,046	0,043	0,037	0,033	
	Tb—Pr	4,99		−0,940	−0,786	−0,560	−0,533	−0,489	−0,436	−0,380	−0,348	−0,306	−0,265	
	Dy—Pr	4,63		−0,850	—	—	−0,497	−0,465	−0,413	−0,358	−0,332	−0,290	−0,252	
	Pr	2,56		−0,843	−0,646	−0,471	−0,480	−0,442	−0,390	−0,334	−0,317	−0,271	−0,243	

* Состав для La и Pr: $R_2O_3 \cdot x B_2O_3$;
 для Tb—Pr и Dy—Pr: $R_2O_3 \cdot R'_2O_3 \cdot x B_2O_3$;
 для других $R_2O_3 \cdot 0,85 La_2O_3 \cdot x B_2O_3$.

Стекло	Состав, массовое содержание, %					V, мин/(э·см) для λ, нм								Т, °К		
						365	404	546	650	700	800	900	1100		1200	1300
Алюмосиликат																
Празеодимовый	Pr ₆ O ₁₁	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Sb ₂ O ₃	—1,04	—0,760	—0,350	—0,238	—0,198	—0,147	—0,112	—0,067	—0,051	—0,035	295
	58	25	12	4	1	—3,42	—2,51	—1,16	—0,780	—0,655	—0,488	—0,371	—0,232	—0,183	—0,138	77,4
Диспрозиновый	Dy ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Sb ₂ O ₃	—0,883	—0,676	—0,336	—0,231	—0,189	—	—	—	—	—	295
	58	25	12	4	1	—3,34	—2,58	—1,28	—0,864	—0,724	—	—	—	—	—	77,4
Тербиевый	Tb ₄ O ₇	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Sb ₂ O ₃	—1,17	—0,857	—0,390	—0,264	—0,216	—0,159	—0,120	—0,074	—0,059	—0,047	295
	58	25	12	4	1	—4,34	—3,20	—1,42	—0,978	—0,800	—0,592	—0,450	—0,281	—0,225	—0,182	77,4

Стекло	Состав*		V, мин/(э·см), при T = 300°K для λ, нм									
	R	x	405	436	480	500	520	546	578	600	635	670
Фосфатное с ионами редкоземельных элементов (R)*	La		0,037	0,030	0,024	0,022	0,020	0,018	0,015	0,014	0,013	—
	Ce	2,67	—0,672	—0,510	—0,366	—0,326	—0,287	—0,253	—0,217	—0,197	—0,173	—0,150
	Pr	3,09	—0,447	—0,332	—0,283	—0,261	—0,236	—0,208	—0,182	—0,170	—0,150	—0,132
	Nd	2,92	—0,250	—0,209	—0,167	—0,155	—0,136	—0,134	—0,094	—0,080	—0,080	—0,071
	Sm	2,87	0,026	0,024	0,020	0,020	0,017	0,015	0,014	0,012	0,011	0,010
	Eu	2,93	—0,025	—0,017	—0,010	—0,006	—0,006	—0,005	—0,004	—0,003	—0,002	—0,002
	Gd	3,01	0,018	0,015	0,014	0,012	0,012	0,011	0,011	0,010	0,009	0,009
	Tb	2,94	—0,560	—0,458	—0,357	—0,323	—0,295	—0,261	—0,226	—0,206	—0,190	—0,164
	Dy	2,51	—0,540	—0,453	—0,359	—0,331	—0,301	—0,268	—0,237	—0,217	—0,197	—0,173
	Ho	2,94	—0,299	—0,313	—0,156	—0,153	—0,138	—0,138	—0,119	—0,110	—0,098	—0,084
	Er	3,01	—0,139	—0,121	—0,100	—0,111	—0,095	—0,062	—0,060	—0,057	—0,051	—0,044
	Tm	2,79	0,019	0,013	0,012	0,009	0,008	0,006	0,005	0,004	0,004	0,007
	Yb	3,01	0,087	0,072	0,056	0,050	0,045	0,041	0,036	0,032	0,029	0,024

* Состав: R₂O₃ · λ P₂O₅.

Таблица 34.8

Постоянные Верде V для жидкостей [3]

Жидкость	λ , нм	T , °C	V , $10^{-2} \frac{\text{мин}}{\text{с} \cdot \text{см}}$
H ₂ O	546	20	1,54
	578	20	1,37
	589	20	1,307
HCl	589	20	2,24
CCl ₄	578	205	1,68
N ₂	589	—19	0,415
NH ₃	578	—40	1,73
N ₂ O	589	—922	5,54
O ₂	589	—18	0,782
PCl ₃	578	26	3,05
SO ₂	578	—10	1,87
Ni(CO) ₄	578	17	7,35
Br ₂	700	0	5,3
BrH	589	20	3,43
SiCl ₄	589	16	1,89
HI	589	20	5,13

Таблица 34.9

Постоянные Верде для органических соединений [3]

Вещество	λ , нм	T , °C	V , $10^{-2} \frac{\text{мин}}{\text{с} \cdot \text{см}}$
C ₄ H ₁₀	578	—10	1,179
C ₆ H ₁₂	589	20	1,1490
C ₆ H ₁₂	589	25	1,240
C ₆ H ₆	578	20	3,10
C ₇ H ₁₄	589	20	1,2946
C ₈ H ₁₂	589	15	2,47
C ₁₀ H ₁₈	589	20	1,3785
C ₁₂ H ₁₀	589	15	3,82
C ₁₃ H ₁₂	589	15	3,22
CH ₃ I	578	18	3,53
CHCl ₃	578	18	1,67
CCl ₄	578	20	1,68
C ₆ H ₅ Cl	589	25	2,891
C ₆ H ₅ Br	589	25	3,25
CH ₃ O	589	26	0,9515
C ₆ H ₅ O	589	15,2	1,13
C ₆ H ₅ N	589	15,2	2,44
C ₆ H ₇ N	589	15	4,14

34.3. КВАДРАТИЧНЫЙ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ (ЭФФЕКТ КЕРРА)

Квадратичный электрооптический эффект, или эффект Керра — появление двойного лучепреломления у изотропного вещества в однородном электрическом поле. Внешнее электрическое поле E ориентирует молекулы, обладающие электрическим моментом (дипольным, квадрупольным и т. п.), в результате возникает анизотропия и показатели преломления $n_{\parallel}$ (вдоль поля) и $n_{\perp}$ (перпендикулярно полю) становятся различными: $n_{\parallel} - n_{\perp} = K n E^2$, разность хода обыкновенного и обыкновенного лучей равна $\Delta = K n l E^2$, здесь K — постоянная Керра, n — показатель преломления в отсутствии поля, l — длина оптического пути.

Эффект Керра, вызванный электрическим полем световой волны, называют высокочастотным. Значение постоянной Керра зависит от природы вещества, частоты света и температуры.

Таблица 34.10

Значения постоянной Керра K для газов при давлении $P = 760$ мм рт. ст. и длине волны $\lambda = 546$ нм [3]

Газ	T , °C	K , $10^{-16} \text{ м}^2/\text{в}^2$	Газ	T , °C	K , $10^{-16} \text{ м}^2/\text{в}^2$
H ₂	34,6	0,045	C ₃ H ₈	0	0,85
O ₂	0	0,45	C ₂ H ₄	0	1,06
N ₂	0	0,30	(CH ₃) ₂ O	18	—5,0
	22	0,14	(C ₂ H ₅) ₂ O	62,7	—3,9
Cl ₂	24	2,3	CH ₃ Cl	18	36,5
CO ₂	17,5	1,5	C ₂ H ₅ Cl	18	55,2
N ₂ O	56,7	21,6	CHCl ₃	89,5	—7,7
	26	3,08	CH ₂ Cl ₂	108,5	4,7
HCl	18	5,75	CH ₃ Cl		
H ₂ S	18	1,59	(CH ₃) ₂ CO	83,1	32,1
NH ₃	17,5	3,48	C ₂ H ₆	113,6	5,56
HCN	20	93,0	C ₆ H ₅ CH ₃	137,7	9,0
SO ₂	18	—9,4	C ₆ H ₅ Cl	153,7	37,2
CH ₄	0	0,24	C ₆ H ₅ NO ₂	235,5	146
C ₂ H ₆	0	0,67			

Таблица 34.11

Значения постоянной Керра для жидкостей при длине волны $\lambda = 546$ нм [3]

Жидкость	T , °C	K , $10^{-12} \text{ м}^2/\text{в}^2$	Жидкость	T , °C	K , $10^{-12} \text{ м}^2/\text{в}^2$
O ₂	90	10,1	o-C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	293	5,48
N ₂	71,4	4,02	(C ₂ H ₅) ₂ O	293	—2,66
CS ₂	293	12,1	CHCl ₃	293	—11,6
C ₆ H ₁₂	293	0,227	C ₆ H ₅ Cl	293	40,7
C ₆ H ₆	293	1,46	C ₆ H ₅ NO ₂	293	1410

34.4. ПЬЕЗООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Пьезооптический эффект, или эффект фотоупругости, состоит в изменении показателя преломления вещества в результате влияния внешних статических или переменных механических напряжений.

Связь между изменением индикатрисы показателя преломления $\Delta(1/n^2)_{ij}$ и тензором механических напряжений S_{kl} определяется упругооптическим тензором p_{ijkl} четвертого ранга. Так как $(1/n^2)_{ij}$ и S_{kl} симметричны и безразмерны, то элементы тензора p_{ijkl} также безразмерны и в силу симметрии по парам индексов (ij) и (kl) можно использовать укороченную запись

$$\Delta \left(\frac{1}{n^2} \right)_i = \sum_{j=1}^6 p_{ij} S_j, \quad i, j = 1, 2, \dots, 6,$$

применяя для пар индексов (ij) и (kl) стандартные обозначения: 1 вместо (11), 2 вместо (22), 3 вместо (33) и 4, 5, 6 соответственно вместо (23) и (32), (13) и (31), (12) и (21.).

Фотоупругие свойства различных веществ для материалов различных точечных групп симметрии (рис. 34.1) приведены в табл. 34.12.

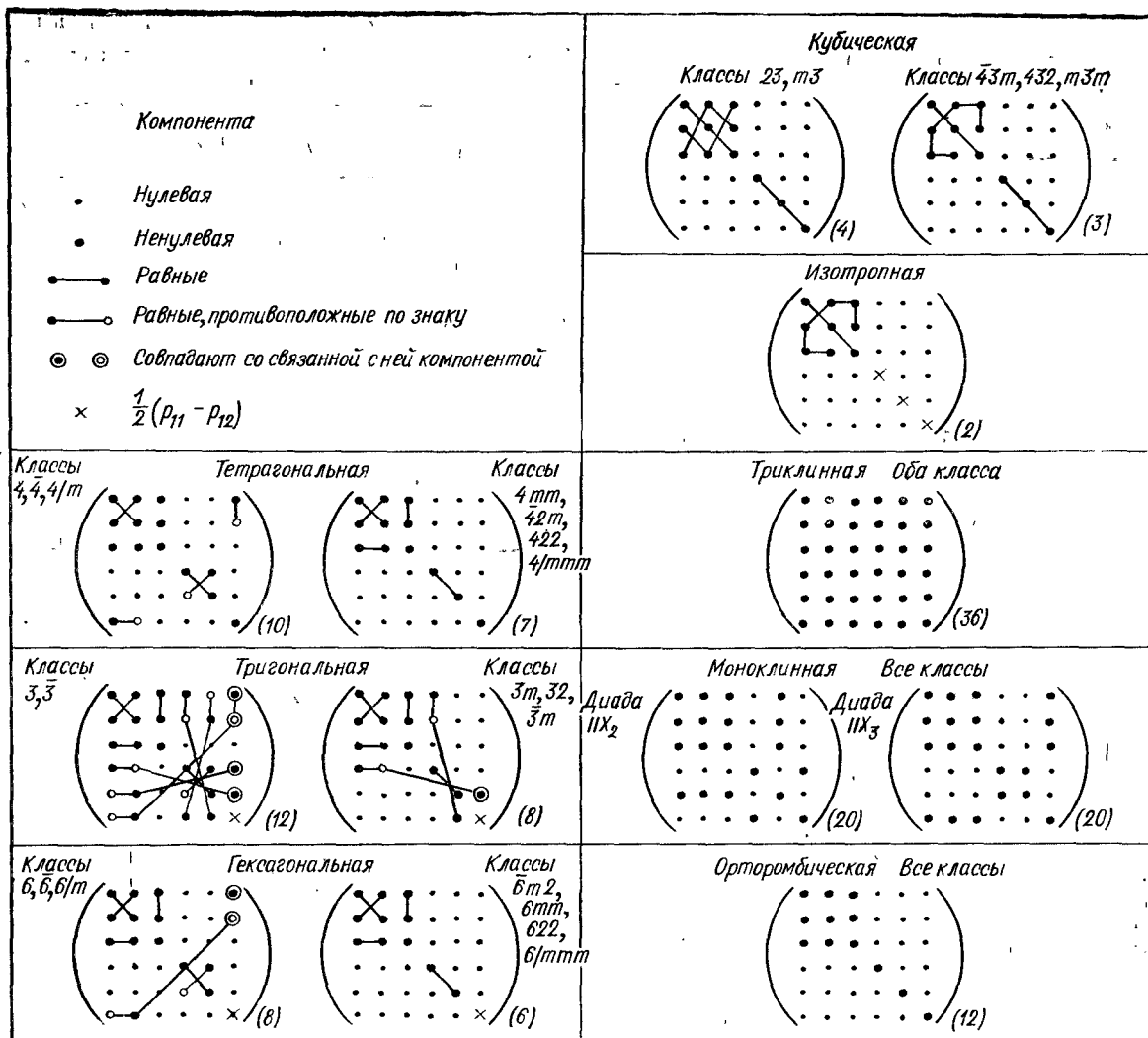


Рис. 34.1. Формы упругооптических тензоров (по сингониям) [4].

Таблица 34.12

Фотоупругие свойства веществ по сингониям [4]

Все измерения выполнены при $T = 300^\circ \text{ К}$. Средняя погрешность для $P_{ij} \pm 5\%$. Если знак не указан, известен только модуль P_{ij} . Коэффициент качества M_2 нормирован по плавленому кварцу. Для плавленого кварца $M_2 = 1,51 \cdot 10^{-18} \text{ сек}^3/\text{г}$

Сингония (класс)	Вещество	$\lambda, \text{ мкм}$	p_{11}	p_{12}	M_2
Изотропная	Кварц плавленый	0,63	+0,121	0,270	1,0
	As ₂ S ₃ — стекло	1,15	+0,308	0,299	230
	Вода	0,63	0,31	0,31	106
	33% Ge, 55% Se, 12% As	1,06	0,21	0,21	164
	Sb ₂ O ₃	0,63	—	—	18
	Стекла разные	0,59	0,09—0,24	0,18÷0,28	—
	Тяжелый флинт	0,63	0,27	0,24	12,5
	PbO · 2Sb ₂ O ₃	0,63	—	—	18,5
	Люцит	0,63	0,30	0,28	33
	Полистирол	0,63	0,30	0,31	84

Сингония (класс)	Вещество	λ , мкм	ρ_{11}	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{14}	ρ_{21}	ρ_{22}	ρ_{23}	ρ_{24}	M_2
Кубическая ($\bar{4}3m$, 432 и $m\bar{3}m$)	GaP	0,63	-0,151	-0,082	-0,074	29,5					
	GaAs	1,15	-0,165	-0,140	-0,072	69					
	$Y_3Al_5O_{12}$ (YAG)	0,63	-0,029	+0,009	-0,061	0,048					
	$Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG)	1,15	0,025	0,073	0,041	0,22					
	β -ZnS	0,63	+0,091	-0,01	+0,075	2,3					
	Ge	10,6	+0,27	+0,235	+0,125	540,0					
	$ZnAl_2O_4$	0,63	< 0,009	0,03	—	0,005					
	$SrTiO_3$	0,63	0,15	0,095	0,072	1,1					
	$Y_3Ga_5O_{12}$	0,63	0,091	0,019	0,079	0,56					
	Бромид таллия	0,63	—	—	—	118,3					
	Алмаз	0,59	-0,31 ÷ -0,43	-0,03 ÷ +0,19	-0,16	—					
	LiF	0,59	+0,02	+0,128	-0,064	—					
	MgO	0,59	-0,32	-0,08	—	—					
	$Bi_4Ge_3O_{12}$	0,63	—	—	—	33					
	KBr	0,59	+0,22	+0,171	-0,026	—					
	KCl	0,59	+0,17	+0,124	—	—					
	KI	0,59	+0,210	+0,169	—	—					
	NaCl	0,59	+0,110	+0,153	-0,010	—					
Сингония (класс)	Вещество	λ , мкм	ρ_{11}	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{14}	ρ_{21}	ρ_{22}	ρ_{23}	ρ_{24}	M_2
Кубическая (23 и $m\bar{3}$)	$Ba(NO_3)_2$	0,63	0,15	0,35	0,29	0,02	15,0				
	$Bi_{12}GeO_{20}$	0,63	—	—	—	—	6,6				
	$Bi_{12}SiO_{20}$	0,63	—	—	—	—	6,0				
	$Pb(NO_3)_2$	0,63	—	—	—	—	17,0				
	$NaBrO_3$	0,59	0,185	0,218	0,213	-0,0139	—				
	$NaClO_3$	0,59	0,162	0,24	0,20	-0,198	—				
Сингония (класс)	Вещество	λ , мкм	ρ_{11}	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{14}	ρ_{21}	ρ_{22}	ρ_{23}	ρ_{24}	M_2
Тригональная ($3m$, 32 и $\bar{3}m$)	$LiTaO_3$	0,63	0,08	0,08	0,09	0,03	0,09	0,15	0,02	0,02	0,91
	α - Al_2O_3	0,63	0,20	0,078	~0	—	0	0,252	—	0,09	0,22
	Te	10,6	0,155	0,130	—	—	—	—	—	—	2,92
	$LiNbO_3$ (P^E)	0,63	-0,02	+0,08	+0,13	-0,08	+0,17	+0,07	-0,15	+0,12	9,0
	Рубин (Al_2O_3 + + 0,05% Cr)	0,63	-0,23	-0,03	+0,02	0,00	-0,04	-0,20	+0,01	-0,10	—
	α -Кварц (SiO_2)	0,59	+0,128	+0,25	+0,259	-0,029	+0,258	+0,098	-0,042	-0,0685	—
	$CaCO_3$	—	+0,095	+0,189	+0,215	-0,006	+0,309	+0,178	+0,01	-0,090	—
(3 и $\bar{3}$)	Li_2WO_4	0,63	—	—	—	—	—	—	—	—	2,5
Сингония (класс)	Вещество	λ , мкм	ρ_{11}	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{14}	ρ_{21}	ρ_{22}	ρ_{23}	ρ_{24}	M_2
Гексагональная ($\bar{6}m2$, $6mm$, 622 и $6/mmm$)	CdS	0,63	0,142	0,066	—	—	0,011	—	—	0,054	8,0
	$LiIO_3$	0,63	0,32	—	—	0,03	0,41	—	—	—	8,3
Сингония (класс)	Вещество	λ , мкм	ρ_{11}	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{14}	ρ_{21}	ρ_{22}	ρ_{23}	ρ_{24}	M_2
Тетрагональная ($4mm$, $42m$, 422 и $4/mmm$)	TiO_2 (рутил)	0,63	-0,011	+0,172	-0,168	—	-0,096	-0,058	—	—	2,6
	ADP	0,63	+0,302	+0,246	+0,236	—	+0,195	+0,263	—	0,075	4,2
	KDP	0,63	+0,251	+0,249	+0,246	—	+0,225	+0,221	—	0,058	2,5
	$ZrSiO_4$	0,63	0,06	—	0,13	—	0,07	0,09	—	0,10	2,4
	TeO_2	0,63	0,0074	+0,187	+0,340	—	+0,090	+0,240	-0,17	-0,046	525,0
	$Sr_{0,75}Ba_{0,25}Nb_2O_6$	0,63	0,16	0,10	0,08	—	0,11	0,47	—	—	26,0
	$Sr_{0,5}Ba_{0,5}Nb_2O_6$	0,63	0,06	0,08	0,17	—	0,09	0,23	—	—	5,8
	$PbMoO_4$	0,63	0,24	0,24	0,255	—	0,15	0,29	—	—	23,7
	$CdMoO_4$	0,63	0,12	0,10	0,13	—	0,11	0,18	—	—	4,5
	$PbWO_4$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21,0

Сингония (класс)	Вещество	λ , мкм	p_{11}	p_{12}	p_{13}	p_{21}	p_{22}	p_{23}	p_{31}	p_{32}	p_{33}	p_{44}	p_{55}	p_{66}	M_2
Ортором- бическая	$\alpha\text{-HfO}_3$	0,63	0,406	0,277	0,304	0,279	0,343	0,305	0,503	0,310	0,334	—	—	0,092	55,0
	$\text{Ca}(\text{NbO}_3)_2$	0,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,3
	PbCO_3	0,63	0,15	0,12	0,16	0,05	0,06	0,21	0,14	0,16	0,12	—	—	—	15,0
	$\text{Ba}_2\text{NaNb}_6\text{O}_{16}$	—	—	—	—	—	—	—	0,17	—	—	—	—	—	5,0÷
	BaSO_4	0,59	+0,21	+0,25	+0,16	+0,34	+0,24	+0,19	+0,27	+0,22	+0,31	+0,002	-0,012	+0,037	-10,0
Моно- клинная (все классы)	Pb_2MoO_6	0,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	27,0

Изменение показателя преломления веществ под действием акустических волн может быть использовано для отклонения у пучков оптических лучей (табл. 34.13).

В табл. 34.12 и 34.13 кроме значений p_{ij} приведены также часто используемые для вычисления свойств материалов коэффициенты «качества» M_1 , M_2 и M_3 :

$$M_1 = \frac{n^2 p^2}{\rho v^3}; \quad M_2 = \frac{n^6 p^2}{\rho v^3}; \quad M_3 = \frac{n^2 p^2}{\rho v^2},$$

где n — показатель преломления; p — компонента тензора фотоупругости; ρ — плотность вещества и v — скорость звука в нем.

Таблица 34.13

Акустико-оптические свойства веществ [4]

Поляризация определяется параллельно ($\parallel$) или перпендикулярно ($\perp$) к плоскости, проходящей через направление распространения световой и акустической волн. Продольная (поперечная) поляризация помечена знаком $\ast$ ($\ast\ast$). Коэффициенты качества нормированы по плавленому кварцу. Коэффициент перевода: $1,51 \cdot 10^{-13} \text{ сек}^3/\text{г}$. Ослабление звука нарастает с частотой как f^x , где $x \geq 1$. При экстраполяции к $f=500 \text{ МГц}$ предполагалось, что $x=2$

Вещество	Область прозрачности, мкм	λ , мкм	n	Направление акустической волны	$v_{\text{зв}}$, см/сек	Поляризация, направление световой волны	M_1	M_2	M_3	Ослабление звука для $f=500 \text{ МГц}$ дБ/мксек
H_2O	0,2—0,9	0,633	1,33	—	1,5	$\parallel$ или $\perp$	6,1	106	24	75
D_2O	0,2—1,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—
GaP	0,6—10,0	0,633	3,31	$\ast$ [110] $\ast\ast$ [100]	6,32 4,13	$\parallel$ $\parallel$ или $\perp$, [010]	75 17,4	29,5 16	69 25,7	$< 1,0$ —
Ge	2—20	10,6	4,0	$\ast$ [111] $\ast\ast$ [100]	5,50 3,51	$\parallel$ $\parallel$ или $\perp$	1270 182	540 190	1380 308	4,2 0,8
Кварц плавленый, SiO_2	0,2—4,5	0,633	1,46	$\ast$ $\ast\ast$	5,96 3,76	$\perp$ $\parallel$ или $\perp$	1,0 0,12	1,0 0,31	1,0 0,2	1,8 —
$\alpha\text{-HfO}_3$	0,3—1,8	0,633	1,98	$\ast$ [001]	2,44	$\perp$, [010]	13,6	55,0	32	0,6
LiNbO_3	0,5—4,5	0,633	2,20	$\ast$ [1120]	6,57	—	8,3	4,6	7,5	$< 0,03$
PbMoO_4	0,4—5,5	0,633	2,39	$\ast$ [001]	3,66	$\parallel$ или $\perp$, [100]	15,3	23,7	24,9	1,2
As_2S_3 -стекло	0,6—11	1,15	2,46	$\ast$	2,6	$\perp$	78,0	230	182	11,0
$\text{Ge}_{33}\text{Se}_{55}\text{As}_{12}$ -стекло	1—14	1,06	2,7	$\ast$	2,52	$\parallel$ или $\perp$	53,0	164	128	1,8
Te	5—20	10,6	4,8	$\ast$ [1120]	2,2	$\parallel$, [0001]	1320	2920	3550	—
TeO_2	0,35—5,0	0,633	2,27	$\ast$ [001] $\ast\ast$ [110]	4,26 0,617	$\perp$, [010] $\parallel$ или $\perp$, [001]	18,5 8,8	22,8 525	25,6 85,0	1,0 3,0
TiO_2	0,45—5,5	0,633	2,58	$\ast$ [1120]	7,86	$\perp$ [0001]	7,9	2,6	6,2	—

34.5. ОПТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ

Способность вещества вращать плоскость поляризации света при прохождении его через вещество называется (естественной) оптической активностью. Оптическую активность веществ характеризуют удельным вращением $[\alpha]_D^t$, т. е. углом поворота α плоскости поляризации света, проходящего через слой вещества толщиной 10 см при температуре t , °С, длине волны λ и кон-

центрации оптически-активного вещества, равной 1 г/см³. Для чисто активной жидкости $[\alpha] = \alpha/(\rho l)$, для растворов $[\alpha] = 100\alpha/(\rho l)$, где α — угол вращения, град; l — толщина слоя, дм; ρ — плотность, г/см³; P — концентрация оптически-активного вещества в граммах на 100 г раствора.

Молекулярная вращательная способность определяется выражением $[M] = [\alpha]M/100 \text{ см}^3 \cdot \text{град}/\text{дм}$, где M — молекулярная масса активного вещества, г.

Таблица 34.14

Оптическая активность метиловых эфиров [3, 5]

Эфир	$[\alpha]_{D}^{20}$, град·см ³ г·дм	$[M]_{D}^{20}$, град·см ³ дм
HCO ₂ C ₁₀ H ₁₉	-79,52	-146,3
CH ₃ CO ₂ C ₁₀ H ₁₉	-79,42	-157,3
C ₂ H ₅ CO ₂ C ₁₀ H ₁₉	-75,51	-160,2
C ₃ H ₇ CO ₂ C ₁₀ H ₁₉	-69,52	-156,9
C ₄ H ₉ CO ₂ C ₁₀ H ₁₉	-65,55	-157,3
C ₅ H ₁₁ CO ₂ C ₁₀ H ₁₉	-62,07	-157,7
C ₆ H ₁₃ CO ₂ C ₁₀ H ₁₉	-58,85	-155,7
C ₇ H ₁₅ CO ₂ C ₁₀ H ₁₉	-55,25	-155,8
C ₈ H ₁₇ CO ₂ C ₁₀ H ₁₉	-53,16	-157,3

Таблица 34.15

Оптическая активность этилтарtrate в различных растворителях [3, 5]

Растворитель	Дипольный момент рас- творителя μ , дебай	$[M]_{546,1}^{20}$, нм, град·см ³ дм
s-C ₄ H ₉ (CH ₃) ₃	0	0
C ₆ H ₅ OCH ₃	1,16	5
C ₄ H ₆	0,4	7,4
C ₆ H ₅ CH ₃	0	12,5
C ₄ H ₆ I	1,25	20,2
C ₆ H ₅ Br	1,56	21,8
C ₆ H ₅ Cl	1,56	23,0
C ₄ H ₆ CN	3,85	67,9
C ₆ H ₅ NO ₂	3,90	80,6
C ₄ H ₆ CONH	2,75	107,7
Чистый этилтарtrate	—	16,25

Таблица 34.16

Удельное вращение кристаллов [3]

Кристалл	Формула	Класс	Длина волны, нм	$[\alpha]$, град мм
Лития-ка- лия суль- фат	KLiSO ₄	C ₆	589	±3,43
Кварц	SiO ₂	D ₃	434 486,1 589,3 656,3	41,924[6] 32,761[6] 21,724[6] 17,320[6]
Киноварь	HgS	D ₃	687	325
Натрия хло- рат	NaClO ₃	T	556	±1,42
Сахар	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	C ₂	589	1,6—5,4*
Сегнетова соль	KNaC ₄ H ₄ O ₆ ·4H ₂ O	D ₂	589	-1,4

* Для различных направлений.

34.6. НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

При воздействии на материальную среду оптического излучения большой интенсивности в ней возникает наведенная поляризация, которая может быть представлена в виде разложения в ряд по степеням действующего электромагнитного поля E :

$$\mathcal{P} = \epsilon [\chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 + \dots],$$

где $\chi^{(1)}$, $\chi^{(2)}$, $\chi^{(3)}$ и т. д. — нелинейные восприимчивости среды, ответственные за нелинейные эффекты, а ϵ — диэлектрическая проницаемость среды. В общем случае в разложении поляризации по степеням поля необходимо учитывать также низкочастотные поля и, кроме того, акустические и оптические фононы. В этом общем случае нелинейные восприимчивости среды будут описывать целый ряд явлений: различные электро- и магнитооптические эффекты, генерацию второй и третьей гармоник, многофононное поглощение, параметрическую генерацию, вынужденные рассеяния — комбинационное, мандельштам-бриллюеновское и рэлеевское, акустико-оптические и другие эффекты.

Генерация второй гармоники в кристаллах

Генерация второй гармоники в кристаллах описывается поляризацией среды

$$\mathcal{P}_i^{(2\omega)} = \epsilon_0 \sum_{j,k=1,2,3} d_{ijk}^{2\omega} E_j^{(\omega)} \cdot E_k^{(\omega)},$$

где коэффициенты $d_{ijk}^{2\omega}$ образуют тензор третьего ранга. Перестановка компонент поля $E_j^{(\omega)}$ и $E_k^{(\omega)}$ не влияет на значение $\mathcal{P}_i^{(2\omega)}$, поэтому члены тензора $d_{ijk}^{2\omega}$ удовлетворяют условиям симметрии $d_{ijk}^{2\omega} = d_{ikj}^{2\omega}$. В силу этого, так же как и для тензора пьезооптического эффекта (см. разд. 34.4), для $d_{ijk}^{2\omega}$ можно воспользоваться сокращенной записью $d_{il}^{2\omega}$, где l в зависимости от j и k пробегает значения от 1 до 6. В сокращенной записи компоненты поляризации среды записываются в матричной форме

$$(P_x, P_y, P_z) =$$

$$= \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} E_x^2 \\ E_y^2 \\ E_z^2 \\ 2E_x E_y \\ 2E_x E_z \\ 2E_y E_z \end{bmatrix}$$

Число ненулевых членов в тензоре $d_{il}^{2\omega}$ зависит от группы точечной симметрии среды. Для различных кристаллических классов вид тензора $d_{il}^{2\omega}$ приведен в табл. 34.17.

Мощность излучения второй гармоники $P^{2\omega}$ определяется соотношением

$$P^{2\omega} \sim \frac{\omega^2 (d_{il}^{2\omega})^2 (P^\omega)^2 L^2}{r_0^2 n^{2\omega} (n^\omega)^2} f(\Delta k),$$

где ω и P^ω — частота и мощность исходного излучения; n^ω и $n^{2\omega}$ — показатели преломления среды для излучения исходной частоты и его второй гармоники; L — длина пути луча в среде; r_0 — радиус луча; $f(\Delta k)$ — функция, описывающая рассогласование волновых векторов исходной световой волны и ее второй гармоники k_ω и $k_{2\omega}$. В тех случаях, когда выполняется условие синхронизма, т. е.

$$2k_\omega = k_{2\omega} \text{ или } v(\omega) = v(2\omega),$$

$\Delta k = 0$ и $f(\Delta k) = 1$. Это возможно только в средах, необладающих дисперсией. В реальных же средах фазовые скорости $v(\omega)$ и $v(2\omega)$ различны, в силу чего $\Delta k > 0$ и $f(\Delta k) < 1$. Более того, при распространении световых волн в среде величина Δk постоянно меняется. Поэтому фазовые соотношения между исходной волной и ее гармоникой сохраняются только на некоторой длине, называемой когерентной:

$$l_{\text{ког}} = \frac{\pi}{2(k_{2\omega} - 2k_\omega)}.$$

В кристалле кварца, например, $l_{\text{ког}}$ составляет всего $\sim 10^{-3}$ см.

Существенное увеличение $l_{\text{ког}}$ достигается при точном выполнении условий синхронизма в анизотропных кристаллах. Здесь, так как показатель преломления, а следовательно, и фазовая скорость, зависят не только от частоты, но и от поляризации волны, оказывается возможным выполнение условий синхронизма на значительно больших длинах. При этом, в зависимости от выбора поляризации и ориентации кристалла, возможны два типа фазового синхронизма. В отрицательных одноосных кристаллах, где показатель преломления для обыкновенной волны n_o (волны с поляризацией, перпендикулярной к плоскости, проходящей через оптическую ось кристалла и направление луча) больше показателя преломления для необыкновенной волны n_e (волны с поляризацией параллельной указанной плоскости), имеем в некотором направлении θ_1 , отсчи-

тываемом от направления оптической оси кристалла:

$$n_e^{2\omega} = n_o^\omega,$$

и в направлении θ_2

$$n_e^{2\omega} = \frac{1}{2} (n_o^\omega + n_e^\omega).$$

Соответственно для положительных одноосных кристаллов

$$n_o^{2\omega} = n_e^\omega; \quad n_o^{2\omega} = \frac{1}{2} (n_e^\omega + n_o^\omega).$$

Для двuosных кристаллов также возможно выполнение фазового синхронизма. Однако и для тех и для других кристаллов само по себе наличие анизотропии показателя преломления недостаточно. Необходимо, чтобы соответствующие поверхности показателей преломления для исходной длины волны и ее гармоники по крайней мере касались друг друга, т. е. чтобы анизотропия была достаточно большой.

Когерентная длина $l_{\text{ког}}$ в реальных условиях эксперимента не обращается в бесконечность, как этого следовало бы ожидать при выполнении условия синхронизма. Расходимость реальных световых пучков приводит к тому, что часть лучей отклоняется от направления синхронизма, даже если ось пучка точно направлена по этому направлению.

Синхронизм называется критическим, если направление фазового синхронизма θ отличается от 90° , и некритическим, если $\theta = 90^\circ$. В первом случае поверхности показателей преломления для исходной волны и ее гармоники пересекаются, что соответствует различию в направлениях для групповых скоростей (векторов Пойнтинга) обыкновенной и необыкновенной волн. Во втором — направления групповых скоростей коллинеарны (поверхности показателей преломления касаются). Переход от критического синхронизма к некритическому можно осуществить с помощью выбора температуры кристалла.

Коэффициенты генерации второй гармоники (элементы тензора $d_{il}^{2\omega}$) нелинейных кристаллов приведены в табл. 34.18. Элементы тензора $d_{ijk}^{2\omega}$ связаны с линейными оптическими восприимчивостями сред через тензор третьего ранга $\delta_{ijk}^{2\omega}$ (тензор Миллера)*

$$d_{ijk}^{2\omega} = \epsilon_0 \chi_{ii}^{2\omega} \chi_{jj}^\omega \chi_{kk}^\omega \delta_{ijk}^{2\omega}.$$

Значения $\delta_{il}^{2\omega}$ также приведены в табл. 34.18. Характерным является то, что вариации элементов тензора $\delta_{il}^{2\omega}$ от вещества к веществу значительно меньше, чем вариации для $d_{il}^{2\omega}$.

Так как абсолютные или относительные знаки коэффициентов второй гармоники определены только для некоторых кристаллов, то они вынесены в отдельную табл. 34.19.

* Соотношение справедливо для кристаллов с симметрией, отличной от триклинной и моноклинной.

Форма тензора генерации второй гармоники для различных кристаллографических классов [6]

Сингония	Класс	Форма тензора	Примечание	Сингония	Класс	Форма тензора	Примечание
Триклинная	$1-C_1$	$\begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix}$	—	Тригональная	$3m-C_{3v}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15}-d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp X$
Моноклинная	$m-C_s$	$\begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & 0 & 0 & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & 0 & 0 & d_{26} \\ 0 & 0 & 0 & d_{34} & d_{35} & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp Z$		$3m-C_{3v}$	$\begin{pmatrix} d_{11}-d_{11} & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0-d_{11} \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp Y$
	$m-C_s$	$\begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & d_{35} & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp Y$		$32-D_3$	$\begin{pmatrix} d_{11}-d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14}-d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—
	$2-C_2$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & d_{25} & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	$2 \parallel Z$	Гексагональная	$\bar{6}-C_{3h}$	$\begin{pmatrix} d_{11}-d_{11} & 0 & 0 & 0 & -d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & 0 & 0 & -d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—
	$2-C_2$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & 0 & d_{25} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{34} & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	$2 \perp Y$		$6-C_6$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15}-d_{14} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	Совпадает с классом $4-C_4$
Ромбическая	$mm2-C_{2v}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—		$\bar{6}m2-D_{3h}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp X$
	$222-D_2$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{25} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	—		$\bar{6}m2-D_{3h}$	$\begin{pmatrix} d_{11}-d_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp Y$
Тетрагональная	$4-C_4$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15}-d_{14} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—		$6mm-C_{6v}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	Совпадает с классом $4mm-C_{4v}$
	$\bar{4}-S_4$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -d_{15} & d_{14} & 0 \\ d_{31}-d_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	—		$622-D_6$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	Совпадает с классом $422-D_4$
	$4mm-C_{4v}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	—	Кубическая	$23-T$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} \end{pmatrix}$	—
	$\bar{4}2m-D_{2d}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	—		$\bar{4}3m-T_d$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} \end{pmatrix}$	—
	$422-D_4$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—		$432-O$	Все члены тензора равны нулю	—
Тригональная	$3-C_3$	$\begin{pmatrix} d_{11}-d_{11} & 0 & d_{14} & d_{15}-d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & d_{15}-d_{14}-d_{11} \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—				

Коэффициенты генерации второй гармоники по сингониям [6]

Сингония Вещество	Класс	$d_{il}^{2\omega} \cdot 10^{-12} \text{ м/с}$	$\delta_{il}^{2\omega} \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda_1, \text{ мкм}$	n^ω	$n^{2\omega}(\theta, \text{ град})$
Моноклиная						
Лития сульфата моногидрат $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	2— C_2	$d_{16} = (?)$ $d_{21} = (?)$ $d_{22} = 0,46 \pm 0,07$ $d_{23} = 0,33 \pm 0,05$ $d_{34} = 0,29 \pm 0,04$	— — — — —	1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 1,152	1,4636 1,4521 1,4657 1,4752 1,4704	1,4624 1,4868 1,4868 1,4868 1,4769 (25)
Калия битартрата гидрат $\text{K}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$	2— C_2	$d_{21} = 0,13$ $d_{22} = 4,26$ $d_{23} = 0$ $d_{25} = 0,19$ $d_{23} = 0,33$	0,68 19,2 0 0,93 1,09	0,6943 0,6942 0,6942 1,152 0,6943	1,4893 1,5194 1,5294 1,5043 1,567	1,5693 1,5693 1,5693 1,5693(20;40) 1,618
Триглицинсульфат (TGS) $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$	2— C_2	$d_{23} = 0,33$	1,09	0,6943	1,567	1,618
Ромбическая						
Аммония биоксалата моногидрат $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	222— D_2	$d_{14} = 0,43$ $\frac{1}{2} (d_{25} + d_{36}) = (0,78 \pm$ $\pm 0,07)$	$\delta_{14} = 2,2$ —	1,06 1,06	1,4802 —	1,5996 —
Гадолиния молибдат $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$	$mm2—C_{2v}$	$d_{15} = 2,98 \pm 0,45$ $d_{24} = 2,93 \pm 0,44$ $d_{31} = 2,83 \pm 0,42$ $d_{32} = 2,75 \pm 0,41$ $d_{33} = 0,05 \pm 0,009$	$\delta_{15} = 2,44 \pm 0,37$ $\delta_{24} = 2,4 \pm 0,36$ $\delta_{31} = 2,30 \pm 0,34$ $\delta_{32} = 2,24 \pm 0,34$ $\delta_{33} = 0,04 \pm 0,007$	1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 1,0642	1,8386 1,8384 1,8146 1,8142 1,8637	1,8549 1,8545 1,9102 1,9102 1,9102
Гиппуровая кислота $\text{C}_6\text{H}_5\text{CO} \cdot \text{NH}(\text{CH}_2\text{CO}_2\text{H})$	222— D_2	$d_{36} = 2,85$	$\delta_{14} = 7,16$	0,6943	1,644	1,61
α -Иодноватая кислота $\alpha\text{-HIO}_3$	222— D_2	$d_{14} = 7,28 \pm 1,8$	$\delta_{14} = 4,43 \pm 1,09$	1,064	1,9391	1,8547 (24; 41,5)
Калия дигидрофосфат (KDP) KH_2PO_4 при $T < -150^\circ\text{C}$	$mm2—C_{2v}$	$d_{14} = 4,83 \pm 0,9$ $d_{15} = 0,57 \pm 0,05$ $d_{24} = 0,38 \pm 0,05$ $d_{31} = 0,58 \pm 0,05$ $d_{32} = 0,39 \pm 0,05$ $d_{33} = 0$	$\delta_{14} = 3,02 \pm 0,56$ $\delta_{15} = 3,3 \pm 0,3$ $\delta_{24} = 2,2 \pm 0,3$ $\delta_{31} = 3,4 \pm 0,3$ $\delta_{32} = 2,3 \pm 0,3$ $\delta_{33} = 0$	1,1526 0,6943 0,6943 0,6943 0,6943 0,6943	1,935 1,4906 1,4906 1,5117 1,5117 1,4694	1,845 1,540 1,540 1,4917 1,4917 1,4917
Литий метагадолиниевый- кислый LiGdO_2	$mm2—C_{2v}$	$d_{15} = d_{31} = 0,08 \pm 0,009$ $d_{24} = d_{32} = 0,175 \pm 0,019$ $d_{33} = 0,686 \pm 0,07$	$0,1 \pm 0,01$ $0,25 \pm 0,027$ $\delta_{33} = 0,88 \pm 0,09$	1,0642 1,0642 1,0642	1,7433 1,7131 1,7399	1,7705 1,7705 1,7705
Лития формиата моно- гидрат $\text{LiCHO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$mm2—C_{2v}$	$d_{15} = d_{31} = (0,11 \pm 0,02)$ $d_{24} = d_{32} = 1,27 \pm 0,09$	$\delta_{11} = 1,33 \pm 0,24$ $\delta_{32} = 8,19 \pm 0,6$	1,0642 1,0642	1,3593 1,4673	1,5229 (81—95) 1,5229 (55,1)
Натрия-бария ниобат $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$	$mm2—C_{2v}$	$d_{33} = 1,86 \pm 0,11$ $d_{15} = 14,56 \pm 0,73$ $d_{24} = 13,83 \pm 0,73$ $d_{31} = 14,56 \pm 0,73$	$\delta_{33} = 10,03 \pm 0,6$ $\delta_{15} = 2,35 \pm 0,11$ $\delta_{24} = 2,23 \pm 0,11$ $\delta_{31} = 2,42 \pm 0,12$	1,0642 1,0642 1,0642 1,0642	1,5035 2,2133 2,2140 2,2567	1,5229 2,3655 2,3672 2,2502 (73—75) (75—77)
		$d_{32} = 14,56 \pm 1,46$	$\delta_{32} = 2,41 \pm 0,16$	1,0642	2,2580	2,2502
Натрия нитрит NaNO_2	$mm2—C_{2v}$	$d_{33} = 20 \pm 1,46$ $d_{31} = d_{15} = 0,2$ $d_{32} = d_{24} = 0,87$	$\delta_{33} = 4,06 \pm 0,30$ 0,88 15,73	1,0642 1,153 1,153	2,1700 1,629 1,3391	2,2502 1,4124 1,4124
Поливинилденфторид $(\text{CH}_2\text{CF}_2)_n$	$mm2—C_{2v}$	$d_{31} = 0,18$ $d_{32} \approx 0$ $d_{33} = 0,36$	$\delta_{31} = 1,9$ $\delta_{32} = 0$ $\delta_{33} \approx 3,8$	1,064 1,064 1,064	— — —	$\approx 1,43$ — —
Свинца ниобат $\text{PbNb}_4\text{O}_{11}$	$mm2—C_{2v}$	$d_{15} = 6,7 \pm 1,0$ $d_{24} = 6,17 \pm 0,93$ $d_{31} = 7,4 \pm 1,1$ $d_{32} = 6,68 \pm 1,00$ $d_{33} = 10,1 \pm 1,5$	$\delta_{15} = 0,84 \pm 0,12$ $\delta_{24} = 0,76 \pm 0,11$ $\delta_{31} = 0,93 \pm 0,14$ $\delta_{32} = 0,83 \pm 0,12$ $\delta_{33} = 1,19 \pm 0,18$	1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 1,0642	2,3115 2,3131 2,2979 2,3010 2,3254	2,4113 2,4137 2,4396 2,4396 2,4396
d -Треонин	222— D_2	$d_{14} = 0,45 \pm 0,07$ $d_{25} = 0,49 \pm 0,07$ $d_{36} = 0,46 \pm 0,07$	$\delta_{14} = 1,72 \pm 0,27$ $\delta_{25} = 1,86 \pm 0,27$ $\delta_{36} = 1,74 \pm 0,27$	1,0642 1,0642 1,0642	1,5821 1,5471 1,5440	1,5243 1,5965 1,6043

Сингония Вещество	Класс	$d_{11}^{2\omega}$, 10^{-12} м/в	$d_{11}^{2\omega}$, 10^{-2} м ² /к	λ_1 , мкм	n^ω	$n^{2\omega}(\theta, \text{град})$
Тербия молибдат $\text{Tb}_2(\text{MoO}_4)_3$	$mm2-C_{2v}$	$d_{15} = 2,87 \pm 0,43$ $d_{24} = 2,9 \pm 0,4$ $d_{31} = 2,6 \pm 0,4$ $d_{32} = 2,52 \pm 0,38$ $d_{33} = 0,12 \pm 0,03$	$\delta_{15} = 2,26 \pm 0,34$ $\delta_{24} = 2,33 \pm 0,32$ $\delta_{31} = 2,08 \pm 0,32$ $\delta_{32} = 1,98 \pm 0,30$ $\delta_{33} = 0,08 \pm 0,02$	1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 1,0642	1,8459 1,8458 1,8226 1,8222 1,8704	1,8649 1,8645 1,9185 1,9185 1,9185
Тригональная						
Алюминия фосфат AlPO_4	$32-D_3$	$d_{11} = (0,41 \pm 0,03)$ $d_{14} \approx 0,009$	$\delta_{11} = 2,07 \pm 0,15$ $\delta_{14} = 0,046$	1,0582 1,0582	1,5156 1,5198	1,5275 1,5275
Бензил $\text{C}_6\text{H}_5\text{COCOC}_6\text{H}_5$	$32-D_3$	$d_{11} = (4,08 \pm 0,55)$	$\delta_{11} = 9,36 \pm 1,26$	1,0642	1,6313	1,669
Калия дитионат $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_4$	$32-D_3$	$d_{11} = 0,087 \pm 0,015$	$\delta_{11} = 0,69 \pm 0,12$	0,6943	1,4518	1,4728
α -Кварц	$32-D_3$	$d_{11} = (0,4 \pm 0,02)$ $d_{14} = 0,009$	$\delta_{11} = 1,86 \pm 0,09$ $\delta_{14} = 0,04$	1,0582 1,0582	1,532 1,536	1,542 1,542
α - SiO_2		$d_{11} = 0,364 \pm 0,04$ $d_{22} = (3,07 \pm 0,28)$ $d_{31} = (5,82 \pm 0,85)$ $d_{33} = (40,68 \pm 10,4)$ $d_{31} = (5,01 \pm 0,47)$ $d_{22} = (2,41 \pm 0,95)$ $d_{15} = (6,28 \pm 0,63)$ $d_{33} = (30,27 \pm 7,57)$	$\delta_{11} = 1,6 \pm 0,2$ $\delta_{22} = 0,497 \pm 0,045$ $\delta_{31} = 1,04 \pm 0,15$ $\delta_{33} = 8,7 \pm 2,2$ $\delta_{31} = 0,92 \pm 0,09$ $\delta_{22} = 0,4 \pm 0,16$ $\delta_{15} = 1,18 \pm 0,12$ $\delta_{33} = 6,7 \pm 1,7$	1,0642 1,0582 1,0582 1,0582 1,152 1,152 0,6328 1,152	1,5341 2,2322 2,2322 2,1544 2,278 2,2278 2,1854 2,1506	1,5468 2,3241 2,2325 2,2325 2,2153 2,3037 2,2854 2,2153
Лития ниобат LiNbO_3	$3m-C_{3v}$	$d_{22} = (3,07 \pm 0,28)$ $d_{31} = (5,82 \pm 0,85)$ $d_{33} = (40,68 \pm 10,4)$ $d_{31} = (5,01 \pm 0,47)$ $d_{22} = (2,41 \pm 0,95)$ $d_{15} = (6,28 \pm 0,63)$ $d_{33} = (30,27 \pm 7,57)$	$\delta_{22} = 0,497 \pm 0,045$ $\delta_{31} = 1,04 \pm 0,15$ $\delta_{33} = 8,7 \pm 2,2$ $\delta_{31} = 0,92 \pm 0,09$ $\delta_{22} = 0,4 \pm 0,16$ $\delta_{15} = 1,18 \pm 0,12$ $\delta_{33} = 6,7 \pm 1,7$	1,0582 1,0582 1,0582 1,152 1,152 0,6328 1,152	2,2322 2,2322 2,1544 2,278 2,2278 2,1854 2,1506	2,3241 2,2325 2,2325 2,2153 2,3037 2,2854 2,2153
Лития танталат LiTaO_3	$3m-C_{3v}$	$d_{22} = (3,07 \pm 0,28)$ $d_{31} = (5,82 \pm 0,85)$ $d_{33} = (40,68 \pm 10,4)$ $d_{31} = (5,01 \pm 0,47)$ $d_{22} = (2,41 \pm 0,95)$ $d_{15} = (6,28 \pm 0,63)$ $d_{33} = (30,27 \pm 7,57)$	$\delta_{22} = 0,497 \pm 0,045$ $\delta_{31} = 1,04 \pm 0,15$ $\delta_{33} = 8,7 \pm 2,2$ $\delta_{31} = 0,92 \pm 0,09$ $\delta_{22} = 0,4 \pm 0,16$ $\delta_{15} = 1,18 \pm 0,12$ $\delta_{33} = 6,7 \pm 1,7$	1,0582 1,0582 1,0582 1,152 1,152 0,6328 1,152	2,2322 2,2322 2,1544 2,278 2,2278 2,1854 2,1506	2,3241 2,2325 2,2325 2,2153 2,3037 2,2854 2,2153
Пираргирит Ag_3SbS_3	$3m-C_{3v}$	$d_{22} = (3,07 \pm 0,28)$ $d_{31} = (5,82 \pm 0,85)$ $d_{33} = (40,68 \pm 10,4)$ $d_{31} = (5,01 \pm 0,47)$ $d_{22} = (2,41 \pm 0,95)$ $d_{15} = (6,28 \pm 0,63)$ $d_{33} = (30,27 \pm 7,57)$	$\delta_{22} = 0,497 \pm 0,045$ $\delta_{31} = 1,04 \pm 0,15$ $\delta_{33} = 8,7 \pm 2,2$ $\delta_{31} = 0,92 \pm 0,09$ $\delta_{22} = 0,4 \pm 0,16$ $\delta_{15} = 1,18 \pm 0,12$ $\delta_{33} = 6,7 \pm 1,7$	1,0582 1,0582 1,0582 1,152 1,152 0,6328 1,152	2,2322 2,2322 2,1544 2,278 2,2278 2,1854 2,1506	2,3241 2,2325 2,2325 2,2153 2,3037 2,2854 2,2153
Прустит Ag_3AsS_3	$3m-C_{3v}$	$d_{22} = (3,07 \pm 0,28)$ $d_{31} = (5,82 \pm 0,85)$ $d_{33} = (40,68 \pm 10,4)$ $d_{31} = (5,01 \pm 0,47)$ $d_{22} = (2,41 \pm 0,95)$ $d_{15} = (6,28 \pm 0,63)$ $d_{33} = (30,27 \pm 7,57)$	$\delta_{22} = 0,497 \pm 0,045$ $\delta_{31} = 1,04 \pm 0,15$ $\delta_{33} = 8,7 \pm 2,2$ $\delta_{31} = 0,92 \pm 0,09$ $\delta_{22} = 0,4 \pm 0,16$ $\delta_{15} = 1,18 \pm 0,12$ $\delta_{33} = 6,7 \pm 1,7$	1,0582 1,0582 1,0582 1,152 1,152 0,6328 1,152	2,2322 2,2322 2,1544 2,278 2,2278 2,1854 2,1506	2,3241 2,2325 2,2325 2,2153 2,3037 2,2854 2,2153
Ртутн сульфид $\alpha\text{-HgS}$	$32-D_3$	$d_{11} = 50,3 \pm 17$	$\delta_{11} = 2,93 \pm 1$	10,6	2,7352	2,758
Селен Se	$32-D_3$	$d_{11} = 79,6 \pm 42$	$\delta_{11} = 4,2 \pm 2,2$	10,6	2,8042	2,5731(90)
Теллур Te	$32-D_3$	$d_{11} = (5319,8 \pm 837,7)$	$\delta_{11} = 1,07 \pm 0,17$	10,5915	6,243	~2,728 (22,5 $\pm$ 5)
Турмалин	$3m-C_{3v}$	$d_{15} = 0,27 \pm 0,04$ $d_{22} = 0,08 \pm 0,01$ $d_{31} = 0,16 \pm 0,03$ $d_{33} = 0,57 \pm 0,07$	$\delta_{15} = 0,70 \pm 0,1$ $\delta_{22} = 0,22 \pm 0,03$ $\delta_{31} = 0,42 \pm 0,08$ $\delta_{33} = 1,58 \pm 0,19$	— — — —	1,618 1,6274 1,6274 1,6088	1,6433 1,6433 1,6231 1,6231
Тетрагональная						
Аммония дигидрофосфат (ADP) $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	$42m-D_{2d}$	$d_{14} = 0,553 \pm 0,024$ $d_{36} = 0,558 \pm 0,028$	$\delta_{14} = 3,19 \pm 0,14$ $\delta_{36} = 3,27 \pm 0,16$	1,0582 1,0582	1,4874 1,5067	1,5277 1,4816
		$d_{14} = 0,482 \pm 0,024$ $d_{36} = 0,487 \pm 0,028$	$\delta_{14} = 2,52 \pm 0,12$ $\delta_{36} = 2,57 \pm 0,15$	0,6943 0,6943	1,4973 1,5193	1,5498 1,5004
		$d_{36} = 0,544 \pm 0,14$ $d_{36} = 0,57 \pm 0,068$ $d_{36} = 0,66 \pm 0,14$ $d_{36} = 0,52 \pm 0,08$	$\delta_{36} = 3,25 \pm 0,84$ $\delta_{36} = 2,93 \pm 0,35$ $\delta_{36} = 3,65 \pm 0,77$ $\delta_{36} = 2,88 \pm 0,44$	1,15 0,6328 0,8250 0,6943	1,50364 1,5217 1,5145 1,5138	1,4794 1,5075 1,4907(42) 1,4926(47)
Аммония дидейтерофосфат (ADDP) $\text{ND}_4\text{D}_2\text{PO}_4$	$42m-D_{2d}$	$d_{36} = 0,544 \pm 0,14$ $d_{36} = 0,57 \pm 0,068$ $d_{36} = 0,66 \pm 0,14$ $d_{36} = 0,52 \pm 0,08$	$\delta_{36} = 3,25 \pm 0,84$ $\delta_{36} = 2,93 \pm 0,35$ $\delta_{36} = 3,65 \pm 0,77$ $\delta_{36} = 2,88 \pm 0,44$	1,15 0,6328 0,8250 0,6943	1,50364 1,5217 1,5145 1,5138	1,4794 1,5075 1,4907(42) 1,4926(47)
Бария титанат BaTiO_3	$4mm-C_{4v}$	$d_{15} = 17,2 \pm 1,42$ $d_{31} = 17,97 \pm 1,42$ $d_{33} = 6,6 \pm 0,5$ $d_{15} = 19,33 \pm 2,0$ $d_{31} = 17,85 \pm 2,0$ $d_{33} = 7,79 \pm 1,17$ $d_{31} = 4,9 \pm 1,5$ $d_{33} = 12,85 \pm 3,8$ $d_{15} = 6,8 \pm 2,3$ $d_{36} = 0,16$	$\delta_{15} = 1,98 \pm 0,16$ $\delta_{31} = 2,11 \pm 0,17$ $\delta_{33} = 0,85 \pm 0,06$ $\delta_{15} = 2,23 \pm 0,23$ $\delta_{31} = 2,10 \pm 0,23$ $\delta_{33} = 1,0 \pm 0,15$ $\delta_{31} = 0,78 \pm 0,24$ $\delta_{33} = 2,20 \pm 0,65$ $\delta_{15} = 1,07 \pm 0,36$ $\delta_{36} = (?)$	1,058 1,058 1,058 1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 0,6328	— — — 2,3175 2,3379 2,2970 2,2506 2,2138 2,2322 —	— — — 2,4760 2,4128 2,4128 2,3092 2,3092 2,3583 (60 $\pm$ 1)
Бария-стронция ниобат $\text{Sr}_{0,5}\text{Ba}_{0,5}\text{Nb}_2\text{O}_6$	$42m-D_{2d}$	$d_{15} = 17,2 \pm 1,42$ $d_{31} = 17,97 \pm 1,42$ $d_{33} = 6,6 \pm 0,5$ $d_{15} = 19,33 \pm 2,0$ $d_{31} = 17,85 \pm 2,0$ $d_{33} = 7,79 \pm 1,17$ $d_{31} = 4,9 \pm 1,5$ $d_{33} = 12,85 \pm 3,8$ $d_{15} = 6,8 \pm 2,3$ $d_{36} = 0,16$	$\delta_{15} = 1,98 \pm 0,16$ $\delta_{31} = 2,11 \pm 0,17$ $\delta_{33} = 0,85 \pm 0,06$ $\delta_{15} = 2,23 \pm 0,23$ $\delta_{31} = 2,10 \pm 0,23$ $\delta_{33} = 1,0 \pm 0,15$ $\delta_{31} = 0,78 \pm 0,24$ $\delta_{33} = 2,20 \pm 0,65$ $\delta_{15} = 1,07 \pm 0,36$ $\delta_{36} = (?)$	1,058 1,058 1,058 1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 0,6328	— — — 2,3175 2,3379 2,2970 2,2506 2,2138 2,2322 —	— — — 2,4760 2,4128 2,4128 2,3092 2,3092 2,3583 (60 $\pm$ 1)
Бериллия сульфата тетрагидрат $\text{BeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	$42m-D_{2d}$	$d_{15} = 17,2 \pm 1,42$ $d_{31} = 17,97 \pm 1,42$ $d_{33} = 6,6 \pm 0,5$ $d_{15} = 19,33 \pm 2,0$ $d_{31} = 17,85 \pm 2,0$ $d_{33} = 7,79 \pm 1,17$ $d_{31} = 4,9 \pm 1,5$ $d_{33} = 12,85 \pm 3,8$ $d_{15} = 6,8 \pm 2,3$ $d_{36} = 0,16$	$\delta_{15} = 1,98 \pm 0,16$ $\delta_{31} = 2,11 \pm 0,17$ $\delta_{33} = 0,85 \pm 0,06$ $\delta_{15} = 2,23 \pm 0,23$ $\delta_{31} = 2,10 \pm 0,23$ $\delta_{33} = 1,0 \pm 0,15$ $\delta_{31} = 0,78 \pm 0,24$ $\delta_{33} = 2,20 \pm 0,65$ $\delta_{15} = 1,07 \pm 0,36$ $\delta_{36} = (?)$	1,058 1,058 1,058 1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 0,6328	— — — 2,3175 2,3379 2,2970 2,2506 2,2138 2,2322 —	— — — 2,4760 2,4128 2,4128 2,3092 2,3092 2,3583 (60 $\pm$ 1)
Кадмия-ртутн тиоцианат $\text{Cd}[\text{Hg}(\text{SCN})_4]$	$4-S_4$	$d_{31} = 6,0 \pm 2,4$ $d_{31} = 7,57 \pm 1,4$ $d_{36} = 1,76 \pm 0,53$	$\delta_{31} = 4,21 \pm 1,69$ $\delta_{31} = 5,3 \pm 0,98$ $\delta_{36} = 1,23 \pm 0,37$	1,06 1,064 1,064	1,924 1,924 1,924	1,792 1,792 1,792

Сингония Вещество	Класс	$d^{2\omega}$, 10^{-12} м/в и/	$\delta^{2\omega}$, 10^{-2} м ² /к и/	λ_1 , мкм	$n^{(0)}$	$n^{2\omega}(\theta, \text{град})$
Калия дидейтерофосфат (KDDP) KD_2PO_4	$\overline{42m} - D_{2d}$	$d_{14} = 0,5 \pm 0,02$ $d_{36} = 0,5 \pm 0,02$ $d_{14} = 0,46 \pm 0,04$ $d_{36} = 0,5 \pm 0,02$	$\delta_{14} = 3,23 \pm 0,13$ $\delta_{36} = 3,24 \pm 0,13$ $\delta_{14} = 2,71 \pm 0,23$ $\delta_{36} = 3,04 \pm 0,12$	1,0582 1,0582 0,6943 0,6943	1,4789 1,4978 1,4830 1,5022	1,5085 1,4689 1,5285 1,4855 (52)
Калия дигидроарсенат (KDA) KH_2AsO_4	$\overline{42m} - D_{2d}$	$d_{14} = 0,55 \pm 0,02$ $d_{36} = 0,52 \pm 0,03$ $d_{14} = 0,41 \pm 0,05$ $d_{36} = 0,47 \pm 0,05$	$\delta_{14} = 2,35 \pm 0,08$ $\delta_{36} = 2,24 \pm 0,13$ $\delta_{14} = 1,58 \pm 0,19$ $\delta_{36} = 1,83 \pm 0,19$	1,0582 1,0582 0,6943 0,6943	1,531 1,554 1,538 1,562	1,572 1,521 1,606 1,549
Калия дигидрофосфат (KDP) KH_2PO_4	$\overline{42m} - D_{2d}$	$d_{11} = 0,49 \pm 0,02$ $d_{36} = 0,47$ $d_{14} = 0,47 \pm 0,03$ $d_{36} = 0,47$ $d_{36} = 0,46 \pm 0,07$ $d_{36} = 0,47 \pm 0,03$	$\delta_{14} = 3,10 \pm 0,13$ $\delta_{36} = 3,02 \pm 0,2$ $\delta_{14} = 2,71 \pm 0,17$ $\delta_{36} = 2,73$ $\delta_{36} = 3,01 \pm 0,46$ $\delta_{36} = 3,01 \pm 0,2$	1,0582 1,0582 0,6943 0,6943 1,15 1,0642	1,4751 1,4939 1,4856 1,5058 1,4913 1,4942	1,5123 1,4706(40,3) 1,5335 1,4874(50,4) 1,4687 1,4708
Калия-лития ниобат $\text{K}_3\text{Li}_2\text{Nb}_2\text{O}_{15}$	$4mm - C_{4v}$	$d_{15} = 6,2 \pm 1,1$ $d_{31} = 7,0 \pm 1,5$ $d_{33} = 12,7 \pm 1,8$ $d_{31} = 12,77$	$\delta_{15} = 1,19 \pm 0,2$ $\delta_{31} = 1,38 \pm 0,3$ $\delta_{33} = 3,14 \pm 0,44$ $\delta_{31} = 2,22$	1,0642 1,0642 1,0642 1,0642	2,1585 2,2057 2,1113 2,2601	2,3297 2,1980 2,1980 2,2007
Калия-натрия-бария ниобат $\text{K}_{0,8}\text{Na}_{0,2}\text{Ba}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$	$4mm - C_{4v}$					
Рубидия дигидроарсенат (RDA) RbH_2AsO_4	$\overline{42m} - D_{2d}$	$d_{36} = 0,3 \pm 0,04$	$\delta_{36} = 1,27 \pm 0,17$	0,6943	~1,555	~1,542
Рубидия дигидрофосфат (RDP) RbH_2PO_4	$\overline{42m} - D_{2d}$	$d_{36} = 0,49$ $d_{14} = 0,56 \pm 0,08$ $d_{36} = 0,43 \pm 0,05$ $d_{15} = 37,9 \pm 5,7$ $d_{31} = 42,8 \pm 6,4$ $d_{33} = 8,5 \pm 1,4$ $d_{14} = 56,5 \pm 19$	$\delta_{36} = 2,83$ $\delta_{14} = 3,47 \pm 0,49$ $\delta_{36} = 2,74 \pm 0,32$ $\delta_{15} = 2,09 \pm 0,3$ $\delta_{31} = 2,39 \pm 0,36$ $\delta_{33} = 0,48 \pm 0,08$ $\delta_{14} = 7,17 \pm 2,4$	0,6943 1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 10,6	1,502 1,4813 1,4926 2,5704 2,5712 2,5692 2,316	1,4969(66) 1,5106 1,4811 2,7398 2,7260 2,7260 2,383
Свинца титанат PbTiO_3	$4mm - C_{4v}$					
Серебра тногаллат AgGaS_2	$\overline{42m} - D_{2d}$					
Цезия дигидроарсенат CsH_2AsO_4	$\overline{42m} - D_{2d}$	$d_{36} = 0,25 \pm 0,04$	$\delta_{36} = 0,93 \pm 0,15$	0,6943 1,06	1,563 —	1,572 — (90)
Цинка-германия фосфид ZnGeP_2	$\overline{42m} - D_{2d}$	$d_{14} = (111 \pm 33)$	$\delta_{14} = 1,96 \pm 0,58$	10,6	3,094	3,114
Гексагональная						
Бериллия окись BeO	$6mm - C_{6v}$	$d_{31} = 0,17 \pm 0,01$ $d_{33} = 0,23 \pm 0,01$ $d_{33} = 79,6 \pm 4,9$ $d_{15} = 31 \pm 7,5$ $d_{31} = 28,5 \pm 6,3$ $d_{33} = 54,5 \pm 12,6$	$\delta_{31} = 0,26 \pm 0,015$ $\delta_{33} = 0,34 \pm 0,015$ $\delta_{33} = 3,54 \pm 0,22$ $\delta_{15} = 2,8 \pm 0,67$ $\delta_{31} = 2,56 \pm 0,57$ $\delta_{33} = 4,73 \pm 1,09$	1,0642 1,0642 1,058 10,6 10,6 10,6	1,7055 1,7204 2,560 2,453 2,445 2,462	1,7376 1,7376 3,036 2,447 2,465 2,465
Кадмия селенид CdSe	$6mm - C_{6c}$	$d_{15} = 17,0 \pm 1,4$ $d_{31} = 15,6 \pm 0,9$ $d_{33} = 30,7 \pm 1,9$ $d_{15} = 28,9 \pm 7,1$ $d_{31} = 26,4 \pm 6,3$ $d_{33} = 44,0 \pm 12,6$	$\delta_{15} = 1,62 \pm 0,13$ $\delta_{31} = 1,5 \pm 0,09$ $\delta_{33} = 2,83 \pm 0,17$ $\delta_{15} = 4,88 \pm 1,2$ $\delta_{31} = 4,45 \pm 1,06$ $\delta_{33} = 7,1 \pm 2,0$	1,0582 1,0582 1,0582 10,6 10,6 10,6	2,336 2,327 2,345 2,252 2,242 2,263	2,649 2,654 2,654 2,244 2,265 2,265
Кадмия сульфид CdS	$6mm - C_{6v}$	$d_{15} = 9,1 \pm 1,1$ $d_{31} = 9,83 \pm 1,1$ $d_{33} = 16,4 \pm 1,8$ $d_{31} = 5,2 \pm 0,7$ $d_{33} = 5,6 \pm 0,3$ $d_{33} = 5,86 \pm 0,36$ $d_{31} = 7,5 \pm 1,1$ $d_{31} = 0,38$ $d_{33} = 0,71$	$\delta_{15} = 0,50 \pm 0,06$ $\delta_{31} = 0,54 \pm 0,06$ $\delta_{33} = 0,84 \pm 0,09$ $\delta_{31} = 4,8 \pm 0,65$ $\delta_{33} = 5,05 \pm 0,3$ $\delta_{33} = 8,37 \pm 0,51$ $\delta_{31} = 6,79 \pm 1,0$ $\delta_{31} = (?)$ $\delta_{33} = (?)$	1,0582 1,0642 1,0642 1,0845 1,0642 1,0642 0,5145 0,6943 0,6943	2,366 2,327 2,345 2,252 2,242 2,263 1,7876 — —	2,649 2,654 2,654 2,244 2,265 2,265 1,9018 — —
Кремния карбид SiC	$6mm - C_{6v}$	$d_{15} = 9,1 \pm 1,1$ $d_{31} = 9,83 \pm 1,1$ $d_{33} = 16,4 \pm 1,8$ $d_{31} = 5,2 \pm 0,7$ $d_{33} = 5,6 \pm 0,3$ $d_{33} = 5,86 \pm 0,36$ $d_{31} = 7,5 \pm 1,1$ $d_{31} = 0,38$ $d_{33} = 0,71$	$\delta_{15} = 0,50 \pm 0,06$ $\delta_{31} = 0,54 \pm 0,06$ $\delta_{33} = 0,84 \pm 0,09$ $\delta_{31} = 4,8 \pm 0,65$ $\delta_{33} = 5,05 \pm 0,3$ $\delta_{33} = 8,37 \pm 0,51$ $\delta_{31} = 6,79 \pm 1,0$ $\delta_{31} = (?)$ $\delta_{33} = (?)$	1,0582 1,0642 1,0642 1,0845 1,0642 1,0642 0,5145 0,6943 0,6943	2,366 2,327 2,345 2,252 2,242 2,263 1,7876 — —	2,649 2,654 2,654 2,244 2,265 2,265 1,9018 — —
Лития иодат LiIO_3	$6 - C_6$	$d_{15} = 2,32 \pm 0,2$ $d_{31} = 2,1 \pm 0,2$ $d_{33} = 7,0 \pm 0,2$ $d_{33} = 13,5 \pm 0,8$ $d_{15} = 21,4 \pm 8,4$ $d_{31} = 18,85 \pm 6,3$ $d_{33} = 37,3 \pm 12,6$	$\delta_{15} = 1,08 \pm 0,09$ $\delta_{31} = 0,98 \pm 0,09$ $\delta_{33} = 3,16 \pm 0,09$ $\delta_{33} = 1,74 \pm 0,1$ $\delta_{15} = 3,42 \pm 1,34$ $\delta_{31} = 3,01 \pm 1,0$ $\delta_{33} = 5,89 \pm 1,99$	1,0582 1,0582 1,0582 1,058 10,6 10,6 10,6	1,947 1,939 1,955 2,299 2,266 2,264 2,269	2,031 2,048 2,048 2,403 2,265 2,270 2,270
Лития-калия сульфат LiKSO_4	$6 - C_6$					
Цинка окись ZnO	$6mm - C_{6v}$					
Цинка сульфид ZnS	$6mm - C_{6v}$					

Сингония Вещество	Класс	$d_{11}^{2\omega}$, 10^{-12} м/в	$d_{11}^{2\omega}$, 10^{-2} м ² /к	λ_1 , мкм	n^ω	$n^{2\omega}$ (в, град)
Кубическая						
Алюминия антимонид AlSb	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 49 \pm 36$	$\delta_{14} = 0,4 \pm 0,29$	1,058	3,3	3,87
Висмута германат Bi ₄ GeO ₁₂	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 1,46$	$\delta_{14} = 0,47$	1,0642	2,0443	2,1152
Галлия антимонид GaSb	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 628 \pm 63$	$\delta_{14} = 2,84 \pm 0,28$	10,6	3,8	3,82
Галлия арсенид GaAs	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 274 \pm 66$ $d_{36} = 249 \pm 15$ $d_{14} = 188,5 \pm 19$ $d_{14} = 140 \pm 10$ $d_{14} = 137$	$\delta_{14} = 1,4 \pm 0,34$ $\delta_{36} = 1,27 \pm 0,08$ $\delta_{14} = 2,26 \pm 0,23$ $\delta_{14} = 0,72 \pm 0,05$ $\delta_{14} = 0,31$	1,0582 1,058 10,6 1,06 0,8435 ÷ ÷ 0,8450	3,479 3,479 3,27 3,478 3,60	4,352 4,352 3,30 4,346 5,90
Галлия фосфид GaP	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 85,6 \pm 14,2$ $d_{36} = 41,2 \pm 2,5$ $d_{14} = 35,0$ $d_{14} = 109$	$\delta_{14} = 1,14 \pm 0,19$ $\delta_{36} = 0,55 \pm 0,03$ $\delta_{14} = 0,73$ $\delta_{14} = 1,9$	1,058 1,058 3,39 10,6	3,10 3,10 3,018 3,00	3,49 3,49 3,04 3,01
Индия антимонид InSb	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 520 \pm 47$	$\delta_{14} = 1,8$	1,058	—	—
Индия арсенид InAs	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 364 \pm 47$ $d_{14} = 418,9 \pm 12,6$	$\delta_{14} = (?)$ $\delta_{14} = 3,27 \pm 0,1$	1,058 10,6	— 3,49	— 3,54
Индия фосфид InP	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 167,0$	$\delta_{14} = 0,94$	1,058	3,44	4,24
Кадмия теллурид CdTe	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 16,7 \pm 6,3$	$\delta_{14} = 0,76 \pm 0,29$	10,6	2,69	2,71
Меди бромид CuBr	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 7,96 \pm 2,7$ $d_{14} = 15,3 \pm 6,9$	$\delta_{14} = 3,73 \pm 1,27$ $\delta_{14} = 5,07 \pm 2,28$	10,6 1,064	1,970 2,011	1,972 2,164
Меди хлорид CuCl	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 4,19$ $d_{14} = 9,1 \pm 4,1$	$\delta_{14} = 2,74$ $\delta_{14} = 4,64 \pm 2,09$	10,6 1,064	1,893 1,923	1,895 2,012
Меди иодид CuI	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 7,96 \pm 2,6$ $d_{14} = 30,2 \pm 13,6$	$\delta_{14} = 1,72 \pm 0,56$ $\delta_{14} = 4,65 \pm 2,09$	10,6 1,064	2,176 2,223	2,178 2,392
Натрия бромат NaBrO ₃	$23 - T$	$d_{14} = 0,28$	$\delta_{14} = 0,71$	0,6943	1,611	1,661
Натрия хлорат NaClO ₃	$23 - T$	$d_{14} = 0,69$	$\delta_{14} = 3,43$	0,6943	1,512	1,540
Уротропин N ₄ (CH ₂) ₆	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 4,73$	$\delta_{14} = 15,7$	1,06	1,577	1,593
Цинка селенид ZnSe	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{36} = 31,7 \pm 1,95$ $d_{14} = 78,3 \pm 29,3$	$\delta_{36} = 2,21 \pm 0,14$ $\delta_{14} = 7,6 \pm 3$	1,058 10,6	2,48 2,42	2,66 2,43
Цинка сульфид β-ZnS	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{36} = 24,6 \pm 1,5$ $d_{14} = 30,6 \pm 8,4$	$\delta_{36} = 3,2 \pm 0,19$ $\delta_{14} = 5,08 \pm 1,39$	1,058 10,6	2,289 2,25	2,40 2,26
Цинка теллурид ZnTe	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{36} = 106,7 \pm 6,6$ $d_{14} = 94,6 \pm 9,5$ $d_{14} = 92,1 \pm 33,5$	$\delta_{36} = 2,96 \pm 0,18$ $\delta_{14} = 2,62 \pm 0,26$ $\delta_{14} = 4,19 \pm 1,5$	1,058 1,058 10,6	2,772 2,772 2,69	3,182 3,182 2,70

Знаки коэффициентов генерации второй гармоники [6]

Таблица 34.19

Вещество	d_{11}	d_{14}	d_{22}	d_{31}	d_{32}	d_{33}	Вещество	d_{11}	d_{14}	d_{22}	d_{31}	d_{32}	d_{33}
Бария-натрия ниобат				—	—	—	Лития формиата моногидрат					—	+
Бария титанат				—	—	—	Лития галлат					—	—
Бериллия окись				—	—	—	Лития иодат					+	—
Гадолиния молибдат				—	+	—	Лития ниобат					—	—
Галлия антимонид		+					Лития танталат			+		—	—
Галлия арсенид		+					Меди хлорид			+		—	—
Галлия фосфид		+					Натрия нитрит		+				
Индия арсенид		+					Свинца ниобат				±	±	±
Кадмия селенид				±		±	Свинца титанат				±	±	±
Кадмия сульфид				—		+	Тербия молибдат				±	±	±
Кадмия теллурид		—					Цинка окись				—	+	—
Калия дигидрофосфат		+					Цинка селенид				+		—
Кварц	+						Цинка сульфид		+				+
Кремния карбид				±		±	Цинка теллурид		+		—		+

Показатели преломления нелинейных кристаллов

В табл. 34.20 представлены данные по показателям преломления нелинейных кристаллов [6]. Для двучосных кристаллов принято, что главные показатели преломления соотносятся как

$$n_{\gamma} > n_{\beta} > n_{\alpha}.$$

Буквами a, b, c обозначены кристаллографические, а X, Y, Z — пьезоэлектрические оси кристаллов. В ряде случаев даны дисперсионные соотношения и изменения показателей преломления с температурой. В этих формулах λ , ν и T представляются соответственно в мкм , см^{-1} и $^{\circ}\text{К}$.

Таблица 34.20

Показатели преломления нелинейных кристаллов [6]

Алюминия фосфат AlPO_4

λ , мкм	n_o	n_e	λ , мкм	n_o	n_e
0,4	1,5369	1,5465	1,4	1,5112	1,5198
0,5	1,5287	1,5385	1,6	1,5088	1,5174
0,6	1,5243	1,5334	1,8	1,5062	1,5145
0,7	1,5215	1,5301	2,0	1,5034	1,5116
0,8	1,5192	1,5281	2,2	1,5001	1,5083
1,0	1,5161	1,5245	2,4	1,4969	1,5048
1,2	1,5136	1,5223	2,6	1,4928	1,5006

Аммония дигидрофосфат $\text{ADP } \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

λ , мкм	n_o	n_e
0,2138560	1,62598	1,56738
0,2288018	1,60785	1,55138
0,2536519	1,58688	1,53289
0,2967278	1,56462	1,51339
0,3021499	1,56270	1,51163
0,3125663	1,55917	1,50853
0,3131545	1,55897	1,50832
0,3341478	1,55300	1,50313
0,3650146	1,54615	1,49720
0,3654833	1,54608	1,49712
0,3662878	1,54592	1,49698
0,3906410	1,54174	
0,4046561	1,53969	1,49159
0,4077811	1,53925	1,49123
0,4358350	1,53578	1,48831
0,4916036		1,48390
0,5460740	1,52662	1,48079
0,5769590	1,52478	1,47939
0,5790654	1,52466	1,47930
0,6328160	1,52166	1,47685
1,013975	1,50835	1,46895
1,128704	1,50446	1,46704
1,152276	1,50364	1,46666

$$n_o^2 = 2,302484 + 1,117089 \cdot 10^{-10} \nu^2 / (1 - \nu^2 / 7,605372 \times 10^9) + 3,751806 \cdot 10^6 / (2,5 \cdot 10^5 - \nu^2)$$

$$n_e^2 = 2,163077 + 9,670312 \cdot 10^{-11} \nu^2 / (1 - \nu^2 / 7,785289 \times 10^9) + 1,451540 \cdot 10^6 / (2,5 \cdot 10^5 - \nu^2)$$

$$\Delta n_o = (n_o^2 - 3,0297 n_o + 2,3004) \cdot 0,713 \cdot 10^{-2} (298 - T)$$

$$\Delta n_e = n_e^2 (0,675 \cdot 10^{-6}) \cdot (298 - T)$$

Аммония дидейтерофосфат $\text{ADDP } \text{ND}_4\text{D}_2\text{PO}_4$

λ , мкм	n_o	n_e	λ , мкм	n_o	n_e
0,350	1,5414	1,4923	0,690	1,5142	1,4737
0,530	1,5198	1,4784	1,060	1,5088	1,4712

Аммония биоксалата моногидрат $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$

λ , мкм	$n_{\alpha=Z}$	$n_{\beta=Y}$	$n_{\gamma=X}$
0,4471	1,4460	1,5599	1,6119
0,4713	1,4447	1,5561	1,6084
0,4922	1,4435	1,5544	1,6050
0,5016	1,4426	1,5536	1,6037
0,5461	1,4406	1,5493	1,5993
0,5780	1,4391	1,5470	1,5965
0,5876	1,4388	1,5469	1,5952
0,6678	1,4362	1,5426	1,5892
0,7016	1,4352	1,5408	1,5874
1,014	1,4295	1,5312	1,5763
1,129	1,4276	1,5284	1,5728
1,367	1,4235	1,5222	1,5652

Бария титанат BaTiO_3

λ , мкм	n_o	n_e	λ , мкм	n_o	n_e
0,4579	2,5637	2,4825	0,5321	2,4760	2,4128
0,4765	2,5355	2,4605	0,6328	2,4164	2,3637
0,4880	2,5206	2,4487	1,0642	2,3379	2,2970
0,5145	2,4917	2,4255	2,1284	2,2947	2,2593

$$n_o^2 - 1 = 4,239\lambda^2 / [\lambda^2 - (0,2229)^2]$$

$$n_e^2 - 1 = 4,0854\lambda^2 / [\lambda^2 - (0,2087)^2]$$

Бария-натрия ниобат $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$

λ , мкм	$n_{a=c=Z}$	$n_{\beta=a=X}$	$n_{\gamma=b=Y}$
0,4579	2,2931	2,4266	2,4284
0,4765	2,2799	2,4076	2,4094
0,4880	2,2727	2,3974	2,3991
0,4965	2,2678	2,3903	2,3920
0,5017	2,2649	2,3862	2,3879
0,5145	2,2583	2,3767	2,3786
0,5321	2,2502	2,3655	2,3672
0,6328	2,2177	2,3205	2,3222
1,0642	2,1700	2,2567	2,2580

$$n_a^2 - 1 = 3,6008\lambda^2 / [\lambda^2 - (0,17944)^2]$$

$$n_{\beta}^2 - 1 = 3,9495\lambda^2 / [\lambda^2 - (0,20035)^2]$$

$$n_{\gamma}^2 - 1 = 3,9495\lambda^2 / [\lambda^2 - (0,20097)^2]$$

Бария-калия-натрия ниобат $\text{K}_x\text{Na}_{1-x}\text{Ba}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$

$$n_o^2 = 3,6680 + 24,681 / [(4,3004)^2 - (1,2394/\lambda)^2]$$

$$n_e^2 = 2,9198 + 46,737 / [(5,1605)^2 - (1,2394/\lambda)^2] \text{ при } 22^{\circ}\text{C}$$

Бензил $(C_6H_5)_2 \cdot (CO)_2$

λ , мкм	n_o	n_e	λ , мкм	n_o	n_e
0,4205	1,737	1,737	0,5461	1,667	1,684
0,4358	1,716	1,720	0,5780	1,660	1,680
0,4380	1,712	1,718	0,5893	1,658	1,679
0,4620	1,694	1,705	0,6560	1,648	1,672
0,4860	1,682	1,695			

$$n_o^2 - 1 = 1,08 + 0,535\lambda^2/[\lambda^2 - (0,24)^2] + 0,0150\lambda^2/[\lambda^2 - (0,398)^2];$$

$$n_e^2 - 1 = 1,35 + 0,370\lambda^2/[\lambda^2 - (0,24)^2] + 0,0138\lambda^2/[\lambda^2 - (0,395)^2]$$

Бериллия окись BeO , 22,4°C

λ , мкм	n_o	n_e
0,430	1,73039	
0,440	1,72924	1,74556
0,450	1,72820	1,74447
0,460	1,72725	1,74348
0,470	1,72626	1,74251
0,480	1,72542	1,74162
0,490	1,72460	1,74073
0,500	1,72388	1,74002
0,510	1,72308	1,73918
0,520	1,72249	1,73852
0,530	1,72177	1,73779
0,540	1,72121	1,73703
0,550	1,72062	1,73644
0,560	1,72006	1,73588
0,570	1,71950	1,73530
0,580	1,71903	1,73477
0,590	1,71856	1,73423
0,600	1,71795	1,73381
0,610	1,71762	1,73322
0,620	1,71710	1,73279
0,630	1,71668	1,73233
0,640	1,71632	1,73191
0,650	1,71589	1,73156
0,660	1,71554	1,73113
0,670	1,71517	1,73075
0,680	1,71482	1,73041
0,690	1,71450	

$$n_o^2 - 1 = 1,919087\lambda^2/(\lambda^2 - 0,00727575) + 3,972323\lambda^2/(\lambda^2 - 199,31087);$$

$$n_e^2 - 1 = 1,972142\lambda^2/(\lambda^2 - 0,00748564) + 17,5787\lambda^2/(\lambda^2 - 779,49122)$$

Висмута германат Bi_4GeO_{12}

λ , мкм	n	λ , мкм	n
0,4765	2,142	0,5321	2,115 ₂
0,4880	2,135 ₇	0,6328	2,086 ₁
0,4965	2,131 ₈	1,0642	2,044 ₃
0,5017	2,128 ₅		
0,5145	2,123 ₇		

$$n^2 - 1 = 3,08959\lambda^2/(\lambda^2 - 0,01337)$$

Гадолиния молибдат $Gd_2(MoO_4)_3$

λ , мкм	$n_{\alpha=b=Y}$	$n_{\beta=a=X}$	$n_{\gamma=c=Z}$
0,4579	1,8758	1,8762	1,9342
0,4765	1,8694	1,8699	1,9270
0,4880	1,8659	1,8663	1,9229
0,4965	1,8634	1,8639	1,9201
0,5017	1,8621	1,8625	1,9185
0,5145	1,8588	1,8593	1,9148
0,5321	1,8545	1,8549	1,9102
0,6328	1,8385	1,8390	1,8915
1,064	1,8142	1,8146	1,8637

$$n_{\alpha}^2 - 1 = 2,2450\lambda^2/(\lambda^2 - 0,022693);$$

$$n_{\beta}^2 - 1 = 2,24654\lambda^2/(\lambda^2 - 0,0226803);$$

$$n_{\gamma}^2 - 1 = 2,41957\lambda^2/(\lambda^2 - 0,0245458)$$

Галлия арсенид GaAs

λ , мкм	n	λ , мкм	n
1,127	3,455	1,550	3,375
1,239	3,425	1,652	3,366
1,377	3,400		

Галлия фосфид GaP

λ , мкм	n	λ , мкм	n
0,5	3,4595	1,8	3,0439
0,6	3,3495	2,0	3,0379
0,7	3,2442	2,2	3,0331
0,8	3,1830	2,4	3,0296
0,9	3,1430	2,6	3,0271
1,0	3,1192	2,8	3,0236
1,1	3,0981	3,0	3,0215
1,2	3,0844	3,2	3,0197
1,4	3,0646	3,4	3,0181
1,6	3,0509	3,6	3,0166
		3,8	3,0159
		4,0	3,0137

Германия-цинка фосфид $ZnGeP$

λ , мкм	n_o	n_e
0,64	3,5052	3,5802
0,66	3,4756	3,5467
0,68	3,4477	3,5160
0,70	3,4233	3,4885
0,75	3,3730	3,4324
0,80	3,3357	3,3915
0,85	3,3063	3,3593
0,90	3,2830	3,3336
0,95	3,2638	3,3124
1,00	3,2478	3,2954
1,20	3,2054	3,2493
1,40	3,1820	3,2244
2,00	3,1490	3,1889

λ , мкм	n_o	n_e
2,40	3,1388	3,1780
3,00	3,1304	3,1693
3,40	3,1263	3,1647
4,00	3,1223	3,1608
4,50	3,1186	3,1561
5,00	3,1149	3,1533
6,00	3,1101	3,1480
7,00	3,1040	3,1420
8,00	3,0961	3,1350
9,00	3,0880	3,1272
10,00	3,0788	3,1183
11,00	3,0689	3,1087
12,00	3,0552	3,0949

Индия антимонид InSb

λ , мкм	n	λ , мкм	n
7,87	4,0	15,13	3,88
8,00	3,99	15,79	3,87
9,01	3,96	16,96	3,86
10,06	3,95	17,85	3,85
11,01	3,93	18,85	3,84
12,06	3,92	19,98	3,82
12,98	3,91	21,15	3,81
13,90	3,90	22,20	3,80

Кадмия селенид CdSe

λ , мкм	n_o	n_e
0,8	2,6448	2,6607
0,9	2,5826	2,6027
1,0	2,5502	2,5696
1,2	2,5132	2,5331
1,4	2,4929	2,5133
1,6	2,4818	2,5008
1,8	2,4732	2,4930
2,0	2,4682	2,4873
2,2	2,4642	2,4840
2,4	2,4612	2,4798
2,6	2,4590	2,4784
2,8	2,4562	2,4757
3,0	2,4542	2,4741
3,2	2,4532	2,4726
3,4	2,4518	2,4714
3,6	2,4509	2,4702
3,8	2,4498	2,4694
4,0	2,4491	2,4685

Кадмия сульфид CdS

λ , мкм	n_o	n_e
0,5120	—	2,751
0,5130	—	2,743
0,5140	—	2,737

λ , мкм	n_o	n_e
0,5150	2,743	2,726
0,5160	2,735	2,720
0,5170	2,727	2,714
0,5180	2,718	2,706
0,5190	2,709	2,702
0,5200	2,702	2,698
0,5210	2,700	2,694
0,5220	2,694	2,689
0,5230	2,687	2,685
0,5240	2,681	2,680
0,5250	2,674	2,675
0,5275	2,661	2,665
0,5300	2,649	2,654
0,5325	2,638	2,644
0,5350	2,628	2,637
0,5375	2,617	2,628
0,5400	2,609	2,622
0,5425	2,602	2,612
0,5450	2,594	2,606
0,5475	2,587	2,600
0,5500	2,580	2,593
0,5750	2,528	2,545
0,6000	2,493	2,511
0,6250	2,467	2,484
0,6500	2,446	2,463
0,6750	2,427	2,446
0,7000	2,414	2,432
0,7500	2,390	2,409
0,8000	2,374	2,392
0,8500	2,364	2,378
0,9000	2,359	2,368
0,9500	2,341	2,359
1,0000	2,334	2,352
1,0500	2,328	2,346
1,1000	2,324	2,340
1,1500	2,320	2,336
1,2000	2,316	2,332
1,2500	2,312	2,329
1,3000	2,309	2,326
1,3500	2,306	2,323
1,4000	2,304	2,321

Кадмия теллурид CdTe

λ , мкм	n	λ , мкм	n
0,903	2,91	7,0—10,0	2,69
1,0	2,84	10	2,69
1,1	2,81	14,0	2,69
1,0—1,3	2,82		

$$n^2 - 1 = 4,68 + 1,53\lambda^2 / (\lambda^2 - 0,366)$$

Кадмия-ртути тиоцианат Cd[Hg(SCN)₄], 27°C

λ , мкм	n_o	n_e
0,530	2,003	1,792
0,633	1,970	1,753
1,06	1,924	1,728

Калия битартрат $K_2C_4H_4O_6 \cdot 1/2H_2O$

λ , мкм	n_o	n_z	n_y
0,3650	1,5156	1,5487	1,5630
0,4047	1,5090	1,5409	1,5541
0,4358	1,5049	1,5368	1,5494
0,5461	1,4961	1,5271	1,5384
0,5780	1,4945	1,5253	1,5363
1,014	1,4846	1,5142	1,5238
1,129	1,4832	1,5127	1,5218
1,367	1,4809	1,5102	1,5183

Калия дигидроарсенат KDA KH_2AsO_4

λ , мкм	n_o	n_e	λ , мкм	n_o	n_e
0,4861	1,5762	1,5252	0,5893	1,5674	1,5179
0,5460	1,5707	1,5206	0,6563	1,5632	1,5146

Калия дигидрофосфат KDP KH_2PO_4

λ , мкм	n_o	n_e
0,2138560	1,60177	1,54615
0,2536519	1,56631	1,51586
0,2800869	1,55263	1,50416
0,2980628	1,54618	1,49824
0,3021499	1,54433	1,49708
0,3035781		1,49667
0,3125663	1,54117	1,49434
0,3131545	1,54098	1,49419
0,3341478		1,48954
0,3650146	1,52932	1,48432
0,3654833	1,52923	1,48423
0,3662878	1,52909	1,48409
0,3906410		1,48089
0,4046561	1,52341	1,47927
0,4077811	1,52301	1,47898
0,4358350	1,51900	1,47640
0,4916036		1,47254
0,5460740	1,51152	1,46982
0,5769580	1,50987	
0,5790654	1,50977	1,46856
0,6328160	1,50737	1,46685
1,013975	1,49535	1,46041
1,128704	1,49205	1,45917
1,152276	1,49135	1,45893
1,357070	1,48455	
1,523100		1,45521
1,529525		1,45512

$$n_o^2 = 2,259276 + 1,008956 \cdot 10^{-10} \sqrt{2} / (1 - \sqrt{2} / 7,726408 \cdot 10^9) + \frac{3,251305 \cdot 10^6}{(2,5 \cdot 10^5 - \sqrt{2})}; n_e^2 = 2,132668 + 8,637494 \cdot 10^{-11} \sqrt{2} / (1 - \sqrt{2} / 7,142631 \cdot 10^9) + 8,069981 \cdot 10^5 / (2,5 \cdot 10^5 - \sqrt{2}); \Delta n_o = 0,402 \cdot 10^{-4} \cdot (n_o^2 - 1,432) (298 - T); \Delta n_e = 0,221 \cdot 10^{-4} \times (n_e^2 - 1,105) (298 - T)$$

Калия дидейторофосфат KDDR KD_2PO_4

λ , мкм	n_o	n_e
0,4047	1,5189	1,4776
0,4078	1,5185	1,4772
0,4358	1,5155	1,4747
0,4916	1,5111	1,4710
0,5461	1,5079	1,4683
0,5779	1,5063	1,4670
0,6234	1,5044	1,4656
0,6907	1,5022	1,4639
1,000	1,4700	1,4400

$$\Delta n_o = 0,228 \cdot 10^{-4} \cdot (n_o^2 - 1,047) (298 - T)$$

$$\Delta n_e = 0,955 \cdot 10^{-5} \cdot n_e^2 (298 - T)$$

Калия дитионат $K_2S_2O_6$

λ , мкм	n_o	n_e
0,313	1,480	1,568
0,334	1,475	1,557
0,365	1,470	1,546
0,405	1,465	1,537
0,436	1,463	1,530
0,546	1,456	1,518
0,578	1,455	1,516
1,014	1,448	1,503
1,367	1,446	1,500
1,709	1,444	1,498
2,930	1,436	1,489
3,39	1,430	1,485

Калия-лития ниобат $K_2Li_2Nb_5O_{15}$

λ , мкм	n_o	n_e
0,4500	2,4049	2,2512
0,4750	2,3751	2,2315
0,5000	2,3546	2,2144
0,5250	2,3349	2,2010
0,5324	2,3260	2,1975
0,5500	2,3156	2,1900
0,5750	2,3016	2,1801
0,6000	2,2899	2,1720
0,6250	2,2799	2,1645
0,6500	2,2711	2,1586
0,6750	2,2631	2,1529

$$n_o^2 - 1 = 3,708 \lambda^2 / (\lambda^2 - 0,04601)$$

$$n_e^2 - 1 = 3,349 \lambda^2 / (\lambda^2 - 0,03564)$$

α -Кварц α -SiO₂

λ , мкм	n_o	n_e
0,185	1,65751	1,68988
0,198	1,65087	1,66394
0,231	1,61395	1,62555
0,340	1,56747	1,57737
0,394	1,55846	1,56805
0,434	1,55396	1,56339
0,508	1,54822	1,55746
0,5893	1,54424	1,55335
0,7680	1,53903	1,54794
0,8325	1,53773	1,54661
0,9914	1,53514	1,54392
1,1592	1,53283	1,54152
1,3070	1,53090	1,53951
1,3958	1,52977	1,53832
1,4792	1,52865	1,53716
1,5414	1,52781	1,53630
1,6815	1,52583	1,53422
1,7614	1,52468	1,53301
1,9457	1,52184	1,53004
2,0531	1,52005	1,52823
2,3000	1,51561	
2,6000	1,50986	
3,0000	1,49953	
3,5000	1,48451	
4,0000	1,46671	
4,2000	1,4569	
5,000	1,417	
6,4500	1,274	
7,000	1,167	

Кислота гиппуровая C₆H₅CO·NH(CH₂CO₂H)

λ , мкм	n_a	n_b	n_γ
0,350	1,55	1,61	1,78
0,589	1,5348	1,5921	1,7598
0,700	1,534	1,589	1,755

Кислота α -иодноватая α -HIO₃

λ , мкм	$n_{a=a=\lambda}$	$n_{b=c=Z}$	$n_{\gamma=b=Y}$
0,450	1,8798	2,0184	2,0560
0,500	1,8621	1,9930	2,0192
0,5325	1,8547	1,9829	2,0103
0,550	1,8497	1,9787	2,0049
0,600	1,8409	1,9665	1,9922
0,650	1,8352	1,9571	1,9812
0,700	1,8308	1,9505	1,9765
0,800	1,8250	1,9407	1,9672
0,850	1,8223	1,9378	1,9639
0,900	1,8206	1,9347	1,9595
0,950	1,8180	1,9318	1,9564
1,000	1,8147	1,9292	1,9537
1,065	1,8123	1,9275	1,9508
1,100	1,8116	1,9260	1,9484
1,200	1,8086	1,9230	1,9436

Кремния карбид SiC

λ , мкм	n_o	n_e	λ , мкм	n_o	n_e
0,4880	2,6916	2,7423	0,5321	2,6689	2,7167
0,5017	2,6837	2,7337	0,6328	2,6351	2,6794
0,5145	2,6771	2,7261	1,0642	2,5830	2,6225

$$n_o^2 - 1 = 5,5515\lambda^2 / [\lambda^2 - (0,1625)^2]$$

$$n_e^2 - 1 = 5,7382\lambda^2 / [\lambda^2 - (0,16897)^2]$$

Лития галлат LiGaO₃

λ , мкм	$n_{a, \beta=Y, Z}$	$n_{\gamma=X}$	λ , мкм	$n_{a, \beta=Y, Z}$	$n_{\gamma=X}$
0,4100	1,7702	1,804	1,4000	1,7095	1,7372
0,4500	1,757	1,7895	1,6000	1,707	1,735
0,5000	1,7466	1,7785	1,8000	1,7045	1,7325
0,5500	1,7395	1,7702	2,0000	1,7025	1,7303
0,6000	1,7343	1,7615	2,2000	1,7005	1,7268
0,7000	1,7268	1,7565	2,4000	1,6978	1,7242
0,8000	1,7218	1,7507	2,6000	1,6955	1,7225
0,9000	1,7185	1,7475	2,8000	1,6925	1,720
1,0000	1,716	1,7445			
1,2000	1,7122	1,7405			

Лития иодат LiIO₃

λ , мкм	n_o	n_e	λ , мкм	n_o	n_e
0,4579	1,9186	1,7633	0,5145	1,9018	1,7506
0,4765	1,9124	1,7586	0,5321	1,8978	1,7475
0,4880	1,9089	1,7560	0,6328	1,8815	1,7351
0,4965	1,9065	1,7541	1,0642	1,8517	1,7168
0,5017	1,9051	1,7531			

$$n_o^2 - 1 = 2,40109\lambda^2 / (\lambda^2 - 0,021865)$$

$$n_e^2 - 1 = 1,91359\lambda^2 / (\lambda^2 - 0,01940)$$

Лития формиата моногидрат LiCHO₂·H₂O

λ , мкм	$n_{a=X=a}$	$n_{b=Y=b}$	$n_{\gamma=Z=c}$
0,4579	1,3708	1,4901	1,5308
0,4765	1,3698	1,4883	1,5286
0,4880	1,3692	1,4873	1,5272
0,4965	1,3688	1,4866	1,5264
0,5017	1,3686	1,4862	1,5258
0,5145	1,3680	1,4851	1,5245
0,5321	1,3675	1,4838	1,5229
0,6328	1,3645	1,4784	1,5163
1,0642	1,3593	1,4673	1,5035

$$n_a^2 - 1 = 0,8415\lambda^2 / [\lambda^2 - (0,0953)^2]; n_b^2 - 1 = 1,14106\lambda^2 / [\lambda^2 - (0,1183)^2]; n_\gamma^2 - 1 = 1,2454\lambda^2 / [\lambda^2 - (0,12496)^2]$$

Лития ниобат LiNbO_3

λ , мкм	n_o	n_e
0,42	2,4144	2,2638
0,45	2,3814	2,2765
0,50	2,3444	2,2446
0,55	2,3188	2,2241
0,60	2,3002	2,2083
0,70	2,2862	2,1964
0,80	2,2756	2,1874
0,90	2,2598	2,1741
1,00	2,2487	2,1647
1,20	2,2407	2,1580
1,40	2,2291	2,1481
1,60	2,2208	2,1410
1,80	2,2139	2,1351
2,00	2,2074	2,1297
2,20	2,2015	2,1244
2,40	2,1948	2,1187
2,60	2,1882	2,1138
2,80	2,1814	2,1080
3,00	2,1741	2,1020
3,20	2,1663	2,0955
3,40	2,1580	2,0886
3,60	2,1493	2,0814
3,80	2,1398	2,0735
4,00	2,1299	2,0652
4,20	2,1193	2,0564

$$n_o^2 - 1 = 3,9130 + \frac{1,173 \cdot 10^5 + 1,65 \cdot 10^{-2} T^2}{\lambda^2 - (2,12 \cdot 10^2 + 2,7 \cdot 10^{-5} T^2)^2} -$$

$$- 2,78 \cdot 10^{-8} \lambda^2; \quad n_e^2 - 1 = 3,5567 + 2,605 \cdot 10^{-7} T^2 +$$

$$+ \frac{0,970 \cdot 10^5 + 2,70 \cdot 10^{-2} T^2}{\lambda^2 - (2,01 \cdot 10^2 + 5,4 \cdot 10^{-5} T^2)^2} - 2,24 \cdot 10^{-8} \lambda^2$$

Лития сульфата моногидрат $\text{LiSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$

λ , мкм	n_α	n_β	n_γ
0,3650	1,4771	1,4926	1,5029
0,4047	1,4722	1,4876	1,4980
0,4358	1,4693	1,4849	1,4951
0,4471	1,4686	1,4834	1,4941
0,4713	1,4670		1,4926
0,5016	1,4652	1,4802	1,4905
0,5461	1,4631	1,4782	1,4882
0,5780	1,4619	1,4772	1,4867
0,5876	1,4616	1,4766	1,4866
0,6678	1,4593	1,4743	1,4838
0,7016	1,4585		1,4831
1,014	1,4538	1,4678	1,4777
1,129	1,4525	1,4666	1,4761
1,367	1,4502	1,4636	1,4732
1,530	1,4485		1,4708
1,709	1,4466	1,4588	1,4676

Лития танталат LiTaO_3

λ , мкм	n_o	n_e
0,45	2,2420	2,2468
0,50	2,2160	2,2205
0,60	2,1834	2,1878
0,70	2,1652	2,1696
0,80	2,1538	2,1578
0,90	2,1454	2,1493
1,00	2,1391	2,1432
1,20	2,1305	2,1341
1,40	2,1236	2,1273
1,60	2,1174	2,1213
1,80	2,1120	2,1170
2,00	2,1066	2,1115
2,20	2,1009	2,1053
2,40	2,0951	2,0993
2,60	2,0891	2,0936
2,80	2,0825	2,0871
3,00	2,0755	2,0799
3,20	2,0680	2,0727
3,40	2,0601	2,0649
3,60	2,0513	2,0561
3,80	2,0424	2,0473
4,00	2,0335	2,0377

Меди бромид CuBr

λ , мкм	n	λ , мкм	n
0,4358	$2,336 \pm 0,002$	0,5791	$2,122 \pm 0,002$
0,4678	$2,229 \pm 0,002$	0,5896	$2,117 \pm 0,002$
0,4800	$2,207 \pm 0,002$	0,6438	$2,096 \pm 0,002$
0,5086	$2,171 \pm 0,002$	0,7699	$2,069 \pm 0,004$
0,5461	$2,141 \pm 0,002$		

Меди иодид CuI

λ , мкм	n	λ , мкм	n
0,4358	$2,562 \pm 0,002$	0,5791	$2,347 \pm 0,002$
0,4678	$2,461 \pm 0,002$	0,5896	$2,342 \pm 0,002$
0,4800	$2,448 \pm 0,002$	0,6438	$2,315 \pm 0,002$
0,5086	$2,411 \pm 0,002$	0,7699	$2,280 \pm 0,004$
0,5461	$2,372 \pm 0,002$		

Меди хлорид CuCl

λ , мкм	n	λ , мкм	n
0,4047	$2,153 \pm 0,001$	0,5086	$2,004 \pm 0,001$
0,4078	$2,141 \pm 0,001$	0,5461	$1,987 \pm 0,001$
0,4358	$2,072 \pm 0,001$	0,5791	$1,976 \pm 0,001$
0,4678	$2,033 \pm 0,001$	0,5896	$1,972 \pm 0,001$
0,4800	$2,023 \pm 0,001$	0,6438	$1,958 \pm 0,001$
		0,7699	$1,941 \pm 0,002$

Натрия бромат NaBrO_3

$$n^2 - 1 = 1,3194\lambda^2 / [\lambda^2 - (0,09)^2] + 0,2357\lambda^2 / [\lambda^2 - (0,2)^2] - 0,0174\lambda^2$$

Натрия нитрит NaNO_2

λ , мкм	$n_{\alpha=a=X}$	$n_{\beta=b=Y}$	$n_{\gamma=c=Z}$
0,4358	1,3531	1,4212	1,690
0,4800	1,350	1,4166	1,675
0,5086	1,3484	1,4158	1,6685
0,5461	1,3470	1,4137	1,6620
0,5791	1,3458	1,4122	1,6567
0,5889	1,3455	1,4120	1,6555
0,6438	1,3442	1,4105	1,6510

Натрия хлорат NaClO_3

λ , мкм	n	λ , мкм	n
0,2310	1,616	0,4862	1,522
0,2573	1,585	0,5173	1,519
0,2748	1,572	0,5892	1,515
0,3256	1,549	0,6563	1,513
0,3404	1,544	0,6867	1,512
0,3467	1,542	0,7188	1,511
0,3611	1,539		

$$n^2 - 1 = 1,1825\lambda^2/[\lambda^2 - (0,09)^2] + 0,07992\lambda^2/[\lambda^2 - (0,185)^2] - 0,00864\lambda^2$$

Пираргирит Ag_3SbS_3

$$n_o^2 - 1 = 6,585\lambda^2/[\lambda^2 - (0,4)^2] + 0,1133\lambda^2/[\lambda^2 - (15)^2]$$

$$n_e^2 - 1 = 5,845\lambda^2/[\lambda^2 - (0,4)^2] + 0,0202\lambda^2/[\lambda^2 - (15)^2]$$

Прустит Ag_3AsS_3 , 20°C

λ , мкм	n_o	n_e
0,5876		2,7896
0,6328	3,0190	2,7391
0,6678	2,9804	2,7094
1,0140	2,8264	2,5901
1,1290	2,8067	2,5756
1,3670	2,7833	2,5570
1,530	2,7728	2,5485
1,709	2,7654	2,5423
2,50	2,7478	2,5282
3,56	2,7379	2,5213
4,62	2,7318	2,5178

$$n_o^2 = 7,483 + 0,474/(\lambda^2 - 0,09) - 0,0019\lambda^2$$

$$n_e^2 = 6,346 + 0,342/(\lambda^2 - 0,09) - 0,0011\lambda^2$$

Ртуть сульфит $\alpha\text{-HgS}$

λ , мкм	n_o	n_e
0,62	2,9028	3,2560
0,65	2,8655	3,2064
0,68	2,8384	3,1703

Продолжение табл. 34.20

λ , мкм	n_o	n_e
0,70	2,8224	3,1489
0,80	2,7704	3,0743
0,90	2,7383	3,0340
1,00	2,7120	3,0050
1,20	2,6884	2,9680
1,40	2,6730	2,9475
1,60	2,6633	2,9344
1,80	2,6567	2,9258
2,00	2,6518	2,9194
2,20	2,6483	2,9146
2,40	2,6455	2,9108
2,60	2,6433	2,9079
2,80	2,6414	2,9052
3,00	2,6401	2,9036
3,20	2,6387	2,9017
3,40	2,6375	2,9001
3,60	2,6358	2,8987
3,80	2,6353	2,8971
4,00	2,6348	2,8963
5,00	2,6267	2,8863
6,00	2,6233	2,8799
7,00	2,6156	2,8741
8,00	2,6112	2,8674
9,00	2,6066	2,8608
10,00	2,6018	2,8522
11,00	2,5914	2,8434

Рубидия дигидрофосфат RbH_2PO_4

λ , мкм	n_o	n_e
0,4765	1,514	1,4861
0,4880	1,5132	1,4832
0,4965	1,5126	1,4827
0,5017	1,5121	1,4825
0,5145	1,5116	1,4820
0,5321	1,5106	1,4811
0,6328	1,4976	1,4775
1,0642	1,4926	1,4700

$$n_o^2 - 1 = 1,2068\lambda^2/(\lambda^2 - 0,01539)$$

$$n_e^2 - 1 = 1,15123\lambda^2/(\lambda^2 - 0,010048)$$

Свинца ниобат $\text{PbNb}_4\text{O}_{11}$

λ , мкм	$n_{\alpha=a=X}$	$n_{\beta=b=Y}$	$n_{\gamma=c=Z}$
0,4579	2,4754	2,4766	2,5047
0,4765	2,4554	2,4571	2,4845
0,4880	2,4445	2,4465	2,4735
0,4965	2,4371	2,4392	2,466
0,5017	2,4329	2,435	2,4618
0,5145	2,4231	2,4254	2,4518
0,5321	2,4113	2,4137	2,4396
0,6328	2,3644	2,3667	2,3922
1,0642	2,2979	2,301	2,3254

$$n_{\alpha}^2 - 1 = 4,124\lambda^2/[\lambda^2 - (0,202)^2]; \quad n_{\beta}^2 - 1 = 4,139\lambda^2/[\lambda^2 - (0,2011)^2]; \quad n_{\gamma}^2 - 1 = 4,246\lambda^2/[\lambda^2 - (0,2014)^2]$$

Свинца титанат PbTiO_3

λ , мкм	n_o	n_e
0,4880	2,793	2,7744
0,5017	2,7742	2,7574
0,5145	2,7586	2,7431
0,5321	2,7398	2,7260
0,6328	2,6676	2,6594
1,0642	2,5712	2,5692
1,152	2,5637	2,5623

$$n_o^2 - 1 = 5,359\lambda^2 / [\lambda^2 - (0,224)^2]$$

$$n_e^2 - 1 = 5,365\lambda^2 / [\lambda^2 - (0,2170)^2]$$

Селен Se

λ , мкм	n_o	n_e
1,06	$2,790 \pm 0,008$	$3,608 \pm 0,008$
1,15	$2,737 \pm 0,008$	$3,573 \pm 0,008$
3,39	$2,650 \pm 0,01$	$3,460 \pm 0,01$
10,60	$2,64 \pm 0,01$	$3,41 \pm 0,01$

Серебра тногаллат AgGaS_2 , 20°C

λ , мкм	n_o	n_e
0,4916	2,700	2,710
0,5016	2,683	2,676
0,5461	2,619	2,585
0,5780	2,587	2,546
0,5876	2,579	2,537
0,6678	2,529	2,481

$$n_o^2 = 5,728 + 0,2410 / (\lambda^2 - 0,0870) - 0,00210\lambda^2$$

$$n_e^2 = 5,497 + 0,2026 / (\lambda^2 - 0,1307) - 0,00233\lambda^2$$

Теллур Te

λ , мкм	n_o	n_e
4,0	6,372	4,929
5,0	6,316	4,864
6,0	6,286	4,838
7,0	6,270	4,821
8,0	6,257	4,809
9,0	6,253	4,802
10,0	6,246	4,796
12,0	6,237	4,789
14,0	6,230	4,785

Тербия молибдат $\text{Tb}(\text{MoO}_4)_3$

λ , мкм	$n_{a=b=Y}$	$n_{\beta=a=X}$	$n_{\gamma=c=Z}$
0,4579	1,8864	1,8867	1,9433
0,4765	1,8797	1,8800	1,9358

Продолжение табл. 34.20

λ , мкм	$n_{a=b=Y}$	$n_{\beta=a=X}$	$n_{\gamma=c=Z}$
0,4880	1,8760	1,8764	1,9316
0,4965	1,8734	1,8739	1,9288
0,5017	1,8720	1,8724	1,9271
0,5145	1,8687	1,8690	1,9232
0,5321	1,8645	1,8649	1,9185
0,6328	1,8476	1,8482	1,8993
1,0642	1,8222	1,8226	1,8704

$$n_a^2 - 1 = 2,27241\lambda^2 / (\lambda^2 - 0,023359)$$

$$n_{\beta}^2 - 1 = 2,273955\lambda^2 / (\lambda^2 - 0,02333)$$

$$n_{\gamma}^2 - 1 = 2,443016\lambda^2 / (\lambda^2 - 0,025133)$$

d-Тремелин

λ , мкм	$n_{a=X}$	$n_{\beta=Y}$	$n_{\gamma=Z}$
0,4579	1,5299	1,6039	1,6125
0,4765	1,5282	1,6017	1,6100
0,4880	1,5272	1,6004	1,6087
0,4965	1,5266	1,5996	1,6077
0,5017	1,5263	1,5991	1,6072
0,5145	1,5254	1,5979	1,6059
0,5321	1,5243	1,5965	1,6043
0,6328	1,5196	1,5898	1,5974
1,0642	1,5114	1,5788	1,5855

$$n_a^2 - 1 = 1,273\lambda^2 / [\lambda^2 - (0,1032)^2]$$

$$n_{\beta}^2 - 1 = 1,477\lambda^2 / [\lambda^2 - (0,1137)^2]$$

$$n_{\gamma}^2 - 1 = 1,497\lambda^2 / [\lambda^2 - (0,1169)^2]$$

Турмалин

λ , мкм	n_o	n_e
0,4765	1,6474	1,6273
0,4880	1,6465	1,6263
0,4965	1,6457	1,6255
0,5017	1,6454	1,6251
0,5145	1,6446	1,6248
0,5320	1,6433	1,6231
0,6328	1,6378	1,6183
1,0642	1,6274	1,6088

$$n_o^2 - 1 = 1,6346\lambda^2 / (\lambda^2 - 0,010734)$$

$$n_e^2 - 1 = 1,57256\lambda^2 / (\lambda^2 - 0,011346)$$

Уротропин $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$

λ , мкм	n	λ , мкм	n
0,4861	1,5984	0,5780	1,5899
0,5016	1,5953	0,5876	1,5893
0,5461	1,5917	0,6676	1,5856

Цинка окись ZnO

λ , мкм	n_o	n_e
0,45	2,1058	2,1231
0,50	2,0511	2,0681
0,60	1,9985	2,0147
0,70	1,9735	1,9897
0,80	1,9597	1,9752
0,90	1,9493	1,9654
1,00	1,9435	1,9589
1,20	1,9354	1,9500
1,40	1,9298	1,9429
1,60	1,9257	1,9402
1,80	1,9226	1,9370
2,00	1,9197	1,9330
2,20	1,9173	1,9313
2,40	1,9152	1,9297
2,60	1,9128	1,9265
2,80	1,9100	1,9251
3,00	1,9075	1,9214
3,20	1,9049	1,9186
3,40	1,9022	1,9160
3,60	1,8994	1,9127
3,80	1,8964	1,9101
4,00	1,8891	1,9068

Цинка селенид ZnSe

λ , мкм	n	λ , мкм	n
0,589	2,61	1,5	2,45
1,0	2,48	2,0	2,44

$$n^2 - 1 = 2,855 + 2,045\lambda^2/(\lambda^2 - 0,109)$$

Цинка сульфид ZnS

λ , мкм	n_o	n_e	λ , мкм	n_o	n_e
0,3600	2,705	2,709	0,5000	2,421	2,425
0,3750	2,637	2,640	0,5250	2,402	2,407
0,4000	2,560	2,564	0,5500	2,386	2,392
0,4100	2,539	2,544	0,5750	2,375	2,378
0,4200	2,522	2,525	0,6000	2,363	2,368
			0,6250	2,354	2,358
0,4250	2,511	2,514			
0,4300	2,502	2,505	0,6500	2,346	2,350
0,4400	2,486	2,488	0,6750	2,339	2,343
0,4500	2,473	2,477	0,7000	2,332	2,337
0,4600	2,459	2,463	0,8000	2,324	2,328
			0,9000	2,310	2,315
0,4700	2,448	2,453			
0,4750	2,445	2,449	1,000	2,301	2,303
0,4800	2,438	2,443	1,200	2,290	2,294
0,4900	2,428	2,433	1,400	2,285	2,288

Цинка теллурид ZnTe, 25°C

λ , мкм	n	λ , мкм	n
0,569	3,111	0,760	2,871
0,577	3,085	0,770	2,866
0,579	3,079	0,800	2,853
0,589	3,054	1,000	2,790
0,600	3,035	1,200	2,758
0,616	3,005	1,300	2,748
0,650	2,962	1,400	2,741
0,700	2,913	1,500	2,734
0,725	2,893	1,515	2,734
0,750	2,879	2,060	2,71

Вынужденное рассеяние света

В сильном световом поле в нелинейной среде может происходить взаимодействие оптических волн не только друг с другом, но и с акустическими и молекулярными колебаниями вещества. Интенсивная световая волна частоты ω , возбуждая в среде когерентные акустические или молекулярные колебания с частотой Ω , одновременно дает рассеянную световую волну с частотой

$$\omega' = \omega \pm \Omega.$$

Если возбуждаемые колебания являются акустическими, то рассеяние носит название вынужденного рассеяния Мандельштама — Бриллюена (ВРМБ) и

$$\Omega_{M-B} = 2\omega (v_{зв}/c) \sin(\theta/2),$$

где $v_{зв}$ и c — соответственно скорости звука и света в среде; θ — угол, отсчитываемый от направления распространения световой волны (угол наблюдения). Наибольший сдвиг частоты происходит при рассеянии назад ($\theta = \pi$), при этом $\Omega_{M-B} \approx 10^{10}$ гц (~ 1 см $^{-1}$).

Если возбуждаются молекулярные колебания, то в зависимости от строения молекул вещества $\Omega \sim (100 \div 1000)$ см $^{-1}$ и рассеяние носит название вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). В общем случае в ВКР может наблюдаться целый набор частот*

$$\omega' = \omega \pm m\Omega' \pm n\Omega'' \pm \dots,$$

где Ω' , Ω'' — характерные молекулярные колебания данного вещества, а m и n — целые числа.

Характерные сдвиги частот Ω при ВКР [7]

Жидкости	Ω , см $^{-1}$
Бромформ	222
Тетрахлорэтилен	447
Четыреххлористый углерод	460
Этил иодистый	497
Гексафторбензол	515
Бромформ	539
Трихлорэтилен	640
Сероуглерод	656
Хлороформ	667
o-Ксилол	730

* Для рассеяния Мандельштама—Бриллюена аналогично (k —целое):

$$\omega' = \omega \pm k\Omega_{M-B}.$$

	Ω , см^{-1}		Ω , см^{-1}
<i>а</i> -Диметилфенетиламин	836	Мезитилен	2920
Диоксан	836	2-Бромпропан	2920
Морфолин	841	Ацетон	2921
Тиофенол	916	Этиловый спирт	2921
Нитрометан	927	Карвои	2922
Бензол дейтерированный	944	<i>цис</i> -1,2-Диметилциклогексан	2927
Кумол	990	Диметилформамид	2930
1,3-Дибромбензол	990	2-Хлор-2-Метилбутан	2931
Бензол	992	2-Октан	2931
Пиридин	992	<i>цис</i> , <i>транс</i> -1,3-Диметилгексан	2931
Анилин	997	<i>м</i> -Ксилол	2933
Стирол	998	1,2-Диэтиловый эфир винной кислоты	2933
<i>м</i> -Толуидин	999	<i>о</i> -Ксилол	2933
Бромбензол	1000	Пиперидин	2933
Хлорбензол	1001	1,2-Диэтилбензол	2934
Бензонитрил	1002	2-Хлор-2-Метилбутен	2935
<i>трет</i> -Бутилбензол	1002	1-Бромпропан	2935
Этилбензол	1002	Пиперидин	2936
Толуол	1004	Тетрагидрофуран	2939
Фторбензол	1012	Пиперидин	2940
γ -Пиколин	1016	Циклогексанон	2945
<i>м</i> -Крезол	1029	2-Нитропропан	2948
1-Фтор-2-хлорбензол	1030	1,2-Диэтилкарбонат	2955
<i>м</i> -Дихлорбензол	1030	1,2-Дихлорэтан	2956
Иодбензол	1070	<i>транс</i> -Дихлорэтилен	2956
Бензоил хлористый	1086	1-Бромпропан	2962
Бензальдегид	1086	2-Хлор-2-Метилбутан	2962
Анизол	1097	<i>а</i> -Диметилфенетиламин	2967
Пиррол	1178	Диоксан	2967
Фуран	1180	Циклогексанол	2982
Стирол	1315	Циклопентан	2982
Нитробензол	1344	Циклопентанол	2982
1-Бромнафталин	1368	Бромциклопентан	2982
1-Хлорнафталин	1368	<i>о</i> -Дихлорбензол	2982
2-Этилнафталин	1381	<i>п</i> -Хлортолуол	2982
<i>м</i> -Нитротолуол	1389	α -Пиколин	2982
Хинолин	1427	<i>п</i> -Ксилол	2988
Бромциклогексан	1438	<i>о</i> -Ксилол	2992
Фуран	1522	Дибтилфталат	2992
Метилловый эфир салициловой кислоты	1612	1,1,1-Трихлорэтан	3018
Коричный альдегид	1624	Хлоргидрин этилена	3022
Стирол	1629	Изофорон	3022
3-Метилбутadiен	1638	Нитрозодиметиламин	3022
Пентадиен	1655	Пропиленгликоль	3022
Изопрен	1792	Циклогексан	3038
Гексин-1	2116	Стирол	3056
<i>о</i> -Дихлорбензол	2202	Бензол	3064
Бензонитрил	2229	<i>трет</i> -Бутилбензол	3064
Ацетонитрил	2250	1-Фтор-2-Хлорбензол	3084
1,2-Диметиланилин	2292	Живица	3090
Метилциклогексан	2817	Псевдокумол	3093
Метиловый спирт	2831	Уксусная кислота	3162
<i>цис</i> -, <i>транс</i> -1,3-Диметилциклогексан	2844	Ацетонилацетон	3162
Тетрагидрофуран	2849	Метилметакрилат	3162
Циклогексан	2852	γ -Пиколин	3182
<i>цис</i> -1,2-Диметилциклогексан	2854	Анилин	3300
<i>а</i> -Диметилфенетиламин	2856	Вода	3651
Диоксан	2856		
Циклогексан	2863	Твердые вещества	
Циклогексанон	2863	Кварц	128
<i>цис</i> -, <i>транс</i> -1,3-Диметилциклогексан	2870	Ниобат лития	152
<i>цис</i> -1,4-Диметилциклогексан	2873	α -Сера	216
Циклогексан	2884	Ниобат лития	248
Хлористый метилен	2902	Кварц	466
Морфолин	2902	α -Сера	470
2-Октан	2908	Ниобат лития	628
2,3-Диметил-1,5-гексадиен	2910	Вольфрамат кальция	911
Лимонен	2910	Стильбен	997
<i>о</i> -Ксилол	2913	Полистирол	1001
Гексин-1	2915	Кальцит	1084
<i>цис</i> -2-Гептан	2920	Алмаз	1332

	Ω , см ⁻¹
Нафталин	1380
Стильбен	1591
Триглицинсульфат	2422
Триглицинсульфат	2702
Триглицинсульфат	3022
Полистирол	3054

Газы

Кислород	1552
Калия пары	2721
Метан	2916
Дейтерий	2991
Водород	4155

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaminow I. P., Turner E. H. Handbook of Lasers. Ed. Pressley R. J. The Chemical Rubber Co, Cleveland, 1971, p. 447.
2. Chen D. См. [1], p. 460.
3. Волькенштейн М. В. Молекулярная оптика. М.—Л., Гостехиздат, 1951.
4. Pinnow D. A. См. [1], p. 478.
5. Справочник химика. М.—Л., «Химия», 1965.
6. Singh S. См. [1], p. 489.
7. Johnson F. M. См. [1], p. 526.

ГЛАВА 35

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

35.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ В СПЕКТРОСКОПИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Таблица 35.1

Рентгеновским излучением называют электромагнитные волны, длины которых лежат в интервале от 80 до 10⁻⁵ нм.

Исторически первый и наиболее распространенный способ получения рентгеновского излучения состоит в бомбардировке твердого вещества заряженными частицами, ускоренными до достаточно больших энергий. При этом могут иметь место два механизма возникновения рентгеновского излучения.

При первом механизме рентгеновское излучение возникает как тормозное излучение заряженных частиц, взаимодействующих с полем атомов вещества. Спектр такого тормозного излучения имеет непрерывный характер, причем граничное значение длины волны не зависит от атомного номера вещества мишени и определяется только энергией заряженных частиц $h\nu_{\text{гр}} = E_{\text{кин}}$.

Второй механизм состоит в возбуждении электронов внутренних электронных оболочек атомов вещества мишени и последующим излучении этих атомов. Спектр возникающего таким образом рентгеновского излучения имеет линейчатый характер, причем длина волны однозначно определяется атомным номером Z и электронной структурой атомов вещества мишени.

В рентгеновской спектроскопии приняты следующие обозначения. *Термы уровней* атома, для которых главное квантовое число равно 1, 2, 3, 4, 5, 6, обозначаются соответственно буквами K, L, M, N, O, P . Индексы у этих букв соответствуют разным значениям орбитального и полного момента электрона согласно приведенной ниже схеме:

Уровень электрона в атоме	1s	2s	2p _{1/2}	2p _{3/2}	3s
Терм уровня	K	L _I	L _{II}	L _{III}	M _I
Уровень электрона в атоме	3p _{1/2}	3p _{3/2}	3d _{3/2}	3d _{5/2}	и т. д.
Терм уровня	M _{II}	M _{III}	M _{IV}	M _V	и т. д.

Линии, соответствующие переходам электрона в атоме на K, L, M, N -оболочки, образуют K, L, M, N -серии. Линии, возникающие при переходах по такой простой диаграмме уровней называются *диаграммными линиями*. Обозначения диаграммных линий и соответствующие им переходы приведены в табл. 35.1.

Обозначения диаграммных линий рентгеновского излучения [2]

K-серия		L-серия		M-серия	
Переход	Индекс линии	Переход	Индекс линии	Переход	Индекс линии
$K-L_{II}$	α_2	L_I-M_{II}	β_4	$M_{III}-N_V$	γ
$K-L_{III}$	α_1	L_I-M_{III}	β_3	$M_{IV}-N_{III}$	δ
$K-M_{II}$	β_3	L_I-M_{IV}	β_{10}	$M_{IV}-$	β
$K-M_{III}$	β_1	L_I-M_V	β_9	$-N_{VI,V II}$	
$K-M_{IV}$	β_5^{II}	L_I-N_{II}	γ_2	$M_{IV}-$	η
$K-M_V$	β_5^I	L_I-N_{III}	γ_3	$-O_{II, III}$	
$K-M_{IV,V}$	β_5	L_I-O_{II}	γ_4	M_V-N_{II}	ξ_1
$K-N_{II}$	β_2^{II}	L_I-O_{III}	γ_4	M_V-N_{III}	ξ_2
$K-N_{III}$	β_2^I	$L_I-P_{II, III}$	γ_{13}	$-N_{II, III}$	ξ
$K-N_{II, III}$	β_2	$L_{II}-M_I$	η	M_V-N_{VI}	α_2
$K-N_{IV}$	$\beta_{4,r}$	$L_{II}-M_{IV}$	β_1	M_V-N_{VII}	α_1
$K-N_V$	β_4	$L_{II}-N_I$	γ_5		
		$L_{II}-N_{IV}$	γ_1		
		$L_{II}-O_I$	γ_8		
		$L_{II}-O_{IV}$	γ_6		
		$L_{III}-M_I$	l		
		$L_{III}-M_{II}$			
		$L_{III}-M_{III}$	s		
		$L_{III}-M_{IV}$	α_2		
		$L_{III}-M_V$	α_1		
		$L_{III}-N_I$	β_6		
		$L_{III}-N_{IV}$	β_{15}		
		$L_{III}-N_V$	β_2		
		$L_{III}-$	β_7		
		$-N_{VI, VII}$			
		$L_{III}-O_I$	β_7		
		$L_{III}-O_{IV,V}$	β_5		

Переходы, имеющие одинаковое начальное (конечное) состояние и различающиеся значениями полного момента конечного (начального) состояния, дают две диаграммные линии, называемые *спин-дублетом*. Например, K_{α_1} и K_{α_2} -линии образуют спин-дублет.

Помимо диаграммных линий в характеристическом спектре рентгеновского излучения существуют слабые по интенсивности линии, называемые *недиаграммными* линиями, или *сателлитами диаграммных линий*. Коротковолновые сателлиты могут возникать при дополнительной ионизации излучающего атома, а также при переходах на внутренний уровень с оптических уровней атомов, которые были предварительно возбуждены. Сателлиты, проявляющиеся с длинноволновой стороны от диаграммной линии, могут возникать при перекрестных переходах электронов атомов, образующих химическое соединение. Например, длинноволновой сателлит K -линии хлора проявляется в соединении KCl и может быть объяснен переходом $2p$ электрона иона K^+ на уровень $1s$ иона Cl^- [1, 2].

35.2. ЗАКОН МОЗЛИ И ПРАВИЛО СПИН-ДУБЛЕТОВ ДЛЯ ДИАГРАММНЫХ ЛИНИЙ

Для энергий наименьших уровней атомов можно в первом приближении использовать выражение для уровней энергии водородоподобных атомов, тогда для данной

линии зависимость от атомного номера вещества мишени имеет следующий вид (закон Мозли):

$$\sqrt{k/R} = \kappa(Z - \sigma),$$

где k — волновое число рентгеновской линии; R — постоянная Ридберга; величины κ и σ постоянны для рассматриваемой линии. Например, для K_{α_1} -линии $\sigma = 1,13$, $\kappa = 0,874$; для L_{α_1} -линии $\sigma = 7,9$, $\kappa = 0,376$.

В этом же приближении можно получить другое простое соотношение для $\Delta\lambda$ -разности длин волн двух спин-дублетных рентгеновских линий: $\Delta\lambda$ не зависит от атомного номера [1].

35.3. ТАБЛИЦЫ ДИАГРАММНЫХ ЛИНИЙ И КРАЕВ ПОГЛОЩЕНИЯ ЛИНИЙ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Практическое использование рентгеновского излучения часто требует более точного знания характеристического спектра для каждого элемента, чем то, которое следует из закона Мозли. В табл. 35.2—35.5 представлены длины волн и края поглощения для различных элементов.

Длины волн рентгеновского излучения обычно измеряют в единицах «икс» (X) или «килоикс» (kX), которые имеют следующую связь с метрической единицей: $1 kX = (0,100202 \pm 0,000003) \text{ нм}$.

K-серия

Таблица 35.2

Диаграммные линии и края поглощения K -серии элементов от Fm до Ne (длины волн в X) [1, 2]

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень K)											Край поглощения
	L_{II}	L_{III}	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_V	N_{II}	N_{III}	N_{IV}	N_V	$O_{II, III}$	
^{100}Fm	107,661	102,597	—	90,928	—	—	88,302	—	—	—	—	87,436
^{99}Es	110,233	105,171	—	93,184	—	—	90,496	—	—	—	—	90,616
^{98}Cf	113,451	107,830	—	95,534	—	—	92,761	—	—	—	—	91,868
^{97}Bk	115,611	110,576	—	97,917	—	—	95,103	—	—	—	—	94,194
^{96}Cm	118,461	113,412	—	100,402	—	—	97,521	—	—	—	—	96,598
^{95}Am	121,385	116,342	—	102,968	—	—	100,019	—	—	—	—	99,082
^{94}Pu	124,406	119,369	—	105,620	—	—	102,602	—	—	—	—	101,651
^{93}Np	127,526	122,499	—	108,363	—	—	105,273	—	—	—	—	104,309
^{92}U	130,698	125,686	112,062	111,161	110,46	—	108,15	107,96	107,58	—	107,22	106,58
^{90}Th	137,542	132,538	118,022	117,152	116,43	116,43	114,01	113,80	113,42	—	113,00	112,70
^{89}Bi	165,370	160,453	142,484	141,655	140,82	140,82	137,86	137,67	137,30	—	136,81	136,78
^{88}Pb	169,942	165,031	146,506	145,668	144,82	144,65	141,83	141,62	141,26	—	140,72	140,49
^{87}Tl	174,675	169,788	150,666	149,830	148,86	148,86	145,84	145,65	145,23	—	144,79	144,41
^{86}Hg	179,56	174,69	154,92	154,08	153,13	153,13	150,00	149,79	149,38	—	148,90	148,93
^{79}Au	184,691	179,822	159,477	158,651	157,773	157,551	154,505	154,295	153,90	—	153,374	153,20
^{78}Pt	189,988	185,130	164,157	163,334	162,36	162,20	159,053	158,863	158,48	—	157,92	157,70
^{77}Ir	195,494	190,648	169,016	168,193	167,23	167,02	163,808	163,613	163,18	—	162,68	162,09
^{76}Os	201,220	196,386	174,072	173,257	172,26	172,09	168,75	168,56	168,07	—	167,63	167,55
^{75}Re	207,179	202,359	179,325	178,509	177,46	177,29	173,88	173,69	173,26	173,26	172,72	173,5
^{74}W	213,384	208,573	184,790	183,994	182,882	182,711	179,232	179,05	178,55	178,55	178,07	178,22
^{73}Ta	219,846	215,050	190,492	189,693	188,53	188,36	184,802	184,625	184,12	184,12	183,65	183,60

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень K)											Край поглощения
	L_{II}	L_{III}	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_V	N_{II}	N_{III}	N_{IV}	N_V	$O_{II, III}$	
⁷² Hf	226,56	221,76	195,86	195,18	—	—	190,44	190,44	—	—	—	190,10
⁷¹ Lu	233,61	228,85	202,55	201,74	—	—	196,52	196,52	—	—	—	195,10
⁷⁰ Yb	241,00	236,27	209,19	208,37	—	—	203,25	203,25	—	—	—	201,6
⁶⁹ Tm	248,64	243,90	215,61	214,90	—	—	—	—	—	—	—	208,5
⁶⁸ Er	256,70	252,00	223,03	222,18	—	—	216,74	216,74	—	—	—	—
⁶⁷ Ho	264,99	260,30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	222,64
⁶⁶ Dy	273,68	268,91	237,90	237,13	—	—	231,31	231,31	—	—	—	230,10
⁶⁵ Tb	282,92	278,22	246,32	245,54	—	—	239,15	239,15	—	—	—	237,6
⁶⁴ Gd	292,53	287,80	254,74	254,97	—	—	247,65	247,65	—	—	—	246,2
⁶³ Eu	302,69	297,97	263,89	263,10	—	—	256,48	256,48	—	—	—	254,8
⁶² Sm	313,13	308,45	273,95	272,54	—	—	265,78	265,78	—	—	—	264,4
⁶¹ Pm	323,73	319,06	—	282,04	—	—	275,07	275,07	—	—	—	—
⁶⁰ Nd	335,768	331,153	293,410	292,683	—	—	285,76	285,76	—	—	—	284,58
⁵⁹ Pr	348,025	343,428	304,337	303,625	—	—	296,43	296,17	—	—	—	295,1
⁵⁸ Ce	360,936	356,355	315,857	315,155	312,91	312,77	307,77	307,514	306,72	306,72	306,030	306,23
⁵⁷ La	374,522	369,962	327,999	327,298	324,95	324,78	319,446	319,01	318,64	318,97	317,97	318,14
⁵⁶ Ba	388,861	384,313	340,80	340,102	337,64	337,44	—	332,074	331,59	331,59	330,57	330,70
⁵⁵ Cs	403,996	399,461	354,32	353,633	—	—	—	345,386	—	—	—	344,04
⁵⁴ Xe	419,58	415,12	—	367,72	—	—	—	359,16	—	—	—	357,77
⁵³ I	436,922	432,420	383,77	383,110	—	—	—	374,65	—	—	—	373,44
⁶² Te	454,832	450,353	399,829	399,166	—	—	—	390,292	—	—	388,93	389,27
⁵¹ Sb	473,834	469,373	416,87	416,22	413,02	412,92	—	407,128	406,62	406,18	405,82	406,09
⁵⁰ Sn	494,02	489,57	434,96	434,32	430,96	430,87	—	425,02	424,43	424,07	423,79	423,82
⁴⁹ In	515,484	511,059	454,23	453,59	450,05	449,93	—	444,071	443,47	443,01	442,82	442,98
⁴⁸ Cd	538,317	533,904	474,73	474,10	470,38	470,38	—	464,30	463,33	463,33	—	463,15
⁴⁷ Ag	562,65	558,253	496,65	496,01	499,09	499,09	—	486,03	484,86	484,86	—	484,84
⁴⁶ Pd	588,62	584,240	520,09	519,47	515,65	515,65	—	509,18	—	—	—	508,12
⁴⁵ Rh	616,37	612,00	545,09	544,49	540,09	539,92	—	534,01	533,17	532,94	—	532,88
⁴⁴ Ru	646,058	641,735	571,93	571,31	566,83	566,68	—	560,51	559,74	559,74	—	559,34
⁴³ Tc	667,90	673,57	600,20	600,20	—	—	—	588,99	588,99	588,99	—	—
⁴² Mo	712,105	707,831	631,543	630,978	625,78	625,62	—	619,698	618,95	618,73	—	618,48
⁴¹ Nb	748,887	744,649	664,96	664,376	—	—	—	652,80	651,86	651,86	—	651,59
⁴⁰ Zr	788,513	784,297	700,83	700,284	694,47	694,47	—	688,50	687,56	687,56	—	687,38
³⁹ Y	831,317	827,122	739,72	739,188	—	733,01	—	727,13	—	726,19	—	726,15
³⁸ Sr	877,613	873,447	781,83	781,299	—	774,80	—	769,21	—	768,30	—	768,14
³⁷ Rb	927,761	923,636	827,49	826,956	—	820,17	—	814,76	—	813,63	—	813,85
³⁶ Kr	982,1	978,1	877,19	876,68	—	869,04	—	864,34	—	863,47	—	863,72
³⁵ Br	1041,66	1037,59	931,34	930,86	—	923,6	—	918,66	—	—	—	918,09
³⁴ Se	1106,52	1102,48	990,62	990,13	—	982,3	—	977,90	—	—	—	977,73
³³ As	1177,43	1173,44	1055,64	1055,12	—	1046,6	—	1042,87	—	—	—	1042,63
³² Ge	1255,43	1251,48	1127,04	1126,62	—	1117,11	—	1114,57	—	—	—	1114,3
³¹ Ga	1341,24	1337,33	1205,87	1205,42	—	1195,37	—	1193,54	—	—	—	1193,4
³⁰ Zn	1436,04	1432,20	—	1292,55	—	1282,2	—	1281,07	—	—	—	1280,7
²⁹ Cu	1541,23	1537,396	1389,74	1389,36	—	1378,4	—	—	—	—	—	1377,65
²⁸ Ni	1658,34	1654,51	—	1497,05	—	1485,57	—	—	—	—	—	1485,02
²⁷ Co	1789,17	1785,30	—	1617,48	—	1605,58	—	—	—	—	—	1604,87
²⁶ Fe	1935,99	1932,06	—	1752,99	—	1740,54	—	—	—	—	—	1739,83
²⁵ Mn	2101,46	2097,51	—	1906,24	—	1893,21	—	—	—	—	—	1892,54
²⁴ Cr	2288,89	2285,00	—	2080,59	—	2066,62	—	—	—	—	—	2065,9
²³ V	2502,24	2498,42	—	2279,72	—	2264,85	—	—	—	—	—	2263,0
²² Ti	2746,51	2742,87	—	2508,74	—	2493,0	—	—	—	—	—	2491,2
²¹ Sc	3028,4	3025,0	—	2773,9	—	2758,0	—	—	—	—	—	2751,7
²⁰ Ca	3354,81	3351,48	—	3083,4	—	3068,0	—	—	—	—	—	3064,3
¹⁹ K	3737,07	3733,68	—	3446,8	—	3434,5	—	—	—	—	—	3431,0
¹⁸ Ar	4186,10	4183,17	—	3877,99	—	—	—	—	—	—	—	3862,88
¹⁷ Cl	4720,96	4718,07	—	4394,2	—	—	—	—	—	—	—	4388,0
¹⁶ S	5363,92	5361,10	—	5021,56	—	—	—	—	—	—	—	5008,1
¹⁵ P	6144,4	6141,7	—	5792,1	—	—	—	—	—	—	—	5774,9
¹⁴ Si	7113,36	7110,92	6764,0	6764,0	—	—	—	—	—	—	—	6715,2
¹³ Al	8323,30	8321,96	8042	7944	—	—	—	—	—	—	—	7935,2
¹² Mg	9872	9872	9647	9539	—	—	—	—	—	—	—	9492,5
¹¹ Na	11884	11884	11702	11550	—	—	—	—	—	—	—	11516,0
¹⁰ Ne	14618	14618	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень L_I)									Конечный уровень (начальный уровень L_I)					
	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_V	N_{II}	N_{III}	O_{II}	O_{III}	$P_{II, III}$	M_I	M_{IV}	N_I	N_{IV}	O_I	O_{IV}
¹⁰⁰ Fm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	567,960	—	485,692	—	—
⁹⁹ Es	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	584,57	—	499,758	—	—
⁹⁸ Cf	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	601,741	—	514,342	—	—
⁹⁷ Bk	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	619,548	—	529,439	—	—
⁹⁶ Cm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	638,014	—	545,090	—	—
⁹⁵ Am	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	657,125	—	561,337	—	—
⁹⁴ Pu	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	676,934	—	578,151	—	—
⁹³ Np	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	697,463	—	595,600	—	—
⁹² U	746,4	708,79	686,4	679,5	603,86	597,11	575,3	573,6	568,9	803,5	718,51	634,2	613,59	600,0	593,4
⁹¹ Pa	768,3	730,7	707,3	700,3	622,6	615,6	592,5	—	—	827,8	740,7	653,6	632,5	—	612,0
⁹⁰ Th	791,92	753,24	728,6	721,8	640,79	634,13	611,2	609,5	604,6	852,8	763,56	673,4	651,76	637,4	631,13
⁸⁹ Bi	975,01	936,66	903,5	896,0	794,00	789,46	760,5	759,3	755,3	1056,5	950,02	837,7	811,43	—	788,74
⁸⁸ Pb	1005,63	967,21	932,3	925,1	819,17	812,93	784,3	—	—	1090,0	980,83	864,7	838,01	822,0	815,14
⁸⁷ Tl	1036,99	998,50	961,6	954,5	845,71	839,34	810,1	—	—	1125,4	1012,99	892,9	865,71	849,0	842,28
⁸⁶ Hg	1069,2	1030,46	993,6	984,2	872,4	866,2	831,6	—	—	1161,6	1046,52	922,9	894,6	—	872,4
⁸⁵ Au	1104,34	1065,64	1025,60	1018,64	902,44	896,20	866,53	865,34	—	1200,27	1081,26	953,73	924,70	908,25	901,15
⁸⁴ Pt	1139,86	1101,65	1066,0	1052,4	932,33	925,99	895,2	—	—	1240,3	1117,58	985,7	955,99	938,6	932,3
⁸³ Ir	1177,15	1138,47	1094,8	1087,4	963,32	957,13	925,7	—	—	1281,7	1155,40	1019,5	988,76	971,9	964,9
⁸² Os	1215,0	1177,2	—	—	—	—	—	—	—	—	1194,90	—	1022,96	—	—
⁸¹ Re	1256,3	1217,6	1169,8	1162,4	1029,9	1023,6	991,0	—	—	1370,6	1236,03	1091,2	1058,7	—	1034,4
⁸⁰ W	1299,14	1260,3	1209,77	1202,37	1065,89	1059,80	1025,69	1026,57	—	1418,26	1279,18	1130,09	1096,31	1078,93	1072,26
⁷⁹ Ta	1343,07	1304,09	1251,4	1244,4	1103,0	1097,08	1062,4	—	—	1467,9	1324,23	1170,8	1135,58	1118,5	1111,5
⁷⁸ Hi	1389,3	1349,7	1296,7	1287,0	1141,3	1135,6	1100,1	—	—	1519,7	1371,1	1212,1	1176,5	—	—
⁷⁷ Lu	1437,2	1398,2	1339,8	1333,0	1183,2	1177,5	1141,1	—	—	1573,8	1420,7	1256	1220,3	1202	1196,9
⁷⁶ Yb	1488,2	1449,4	—	—	1225,6	1219,8	1182,0	—	—	1631	1472,5	1303,0	1264,8	1248,3	1240,5
⁶⁸ Tm	1541,2	1502,3	—	—	1271,2	1265,3	1226,4	—	—	1692,3	1526,8	1352,3	1312,7	—	—
⁶⁸ Er	1596,4	1557,9	1491,3	1482,3	1318,4	1311,8	1273,2	—	—	1754,8	1583,4	1403	1362,6	—	—
⁶⁷ Ho	1655,3	1616,0	—	—	1367,7	1361,3	1319,7	—	—	1822,0	1643,5	1459	1414,2	—	—
⁶⁶ Dy	1716,7	1677,0	—	—	1420,3	1413,9	1371,4	—	—	1893,5	1706,6	1515,2	1469,7	—	—
⁶⁵ Tb	1781,4	1742,5	1664	—	1473,8	1468,3	1423,9	—	—	1935	1772,7	1574,2	1526,6	—	—
⁶⁴ Gd	1849,3	1810,9	1728,1	—	1531,0	1525,9	1481,8	—	—	2045,2	1842,5	1637,6	1588,6	—	—
⁶³ Eu	1922,1	1882,7	1796	1788	1593,9	1587,7	1540,7	—	—	—	1916,3	1705	1654,3	1629	—
⁶² Sm	1996,4	1958,0	1865,7	1858,1	1655,9	1651,7	1603,3	—	—	2214	1993,6	1775,1	1723,1	—	—
⁶¹ Pm	—	2037,9	—	—	—	—	—	—	—	—	2075,4	—	1795,2	—	—
⁶⁰ Nd	2162,2	2122,2	2019,3	2011,7	1797,4	1792,5	1740,8	—	—	2404,2	2162,2	1931,3	1873,8	1851,4	—
⁵⁹ Pr	2250,1	2212,4	2102,5	2095,8	1875,0	1869,9	1815,3	—	—	2507	2253,9	2016,1	1956,8	1932,2	—
⁵⁸ Ce	2344,2	2305,9	2191,6	2184,0	1955,9	1950,9	1895,2	—	—	2614,7	2351,0	2105,6	2044,3	2019	—
⁵⁷ La	2443,8	2405,3	2285	2277	2041,6	2036,6	1978,7	—	—	2734	2453,3	2200,8	2137,2	—	—
⁵⁶ Ba	2549,7	2510,9	2381,7	2371,3	2134,1	2129,6	2071,9	—	—	2856,2	2562,2	2302,5	2236,7	2218	—
⁵⁵ Cs	2661,1	2622,9	2486,6	2473,0	2232,4	2228,0	2169,6	—	—	2986,7	2678,0	2412,2	2343,0	—	—
⁵⁴ I	2906,10	2868,40	2715,4	2707,95	2442,4	2442,4	2386,3	—	—	3273,25	2931,41	2651,65	2577,14	—	—
⁵² Te	3040,35	3002,75	2841,00	2833,20	2562,1	2562,1	2506,1	—	—	3431,30	3070,46	2784,35	2706,84	—	—
⁵¹ Sb	3183,60	3146,10	2973,05	2966,50	2689,7	2689,7	2634,3	—	—	3600,25	3219,09	2925,85	2845,75	—	—
⁵⁰ Sn	3336,50	3299,10	3115,35	3108,80	2826,8	2826,8	2771,7	—	—	3780,95	3377,96	3078,50	2995,01	—	—
⁴⁹ In	3499,75	3462,70	3267,35	3260,95	2973,8	2973,8	2920,3	—	—	3975,05	3548,03	3242,45	3155,71	—	—

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень L_I)									Конечный уровень (начальный уровень L_{II})					
	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_V	N_{II}	N_{III}	O_{II}	O_{III}	$P_{II, III}$	M_I	M_{IV}	N_I	N_{IV}	O_I	O_{IV}
⁴⁸ Cd	3674,35	3637,40	3429,6	3423,10	3131,2	—	—	—	—	4184,50	3730,54	3418,50	3328,80	—	—
⁴⁷ Ag	3862,40	3825,45	3604,15	3597,70	3300,0	—	—	—	—	4409,2	3926,50	3609,05	3515,45	—	—
⁴⁶ Pd	4062,7	4026,2	3791,0	3784,2	3482,1	—	—	—	—	4650,8	4137,60	3814,4	3716,9	—	—
⁴⁵ Rh	4280,0	4243,5	—	—	3678,0	—	—	—	—	4911,6	4365,10	4036,6	3935,5	—	—
⁴⁴ Ru	4513,7	4477,5	—	—	3889,4	—	—	—	—	5194,4	4611,10	4278,5	4173,6	—	—
⁴² Mo	5038,4	5003,0	—	—	4370,9	—	—	—	—	5835,4	5166,35	4827,0	4716,1	—	—
⁴¹ Nb	5334,5	5299,3	—	—	4644,7	—	—	—	—	6198,1	5481,0	5141,1	5025,8	—	—
⁴⁰ Zr	5656,5	5621,4	—	—	4943,4	—	—	—	—	6593,3	5824,0	5486,4	5373,2	—	—
Элемент	Конечный уровень (начальный уровень L_{III})											Край поглощения			
	M_I	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_V	N_I	N_{IV}	N_V	$N_{VI, VII}$	O_I	$O_{IV, V}$	L_I	L_{II}	L_{III}	
¹⁰⁰ Fm	—	—	—	767,889	755,418	—	—	622,416	—	—	—	449,878	465,430	591,670	
⁹⁹ Es	—	—	—	784,890	772,444	—	—	636,930	—	—	—	462,905	479,128	605,273	
⁹⁸ Cf	—	—	—	802,399	790,052	—	—	651,897	—	—	—	476,416	493,341	620,574	
⁹⁷ Bk	—	—	—	820,545	808,217	—	—	667,368	—	—	—	490,408	508,090	635,784	
⁹⁶ Cm	—	—	—	839,246	827,017	—	—	683,365	—	—	—	504,959	523,393	651,553	
⁹⁵ Am	—	—	—	858,580	846,422	—	—	699,949	—	—	—	520,027	539,270	667,908	
⁹⁴ Pu	—	—	—	878,639	866,517	—	—	717,109	—	—	—	535,697	555,790	684,878	
⁹³ Np	—	—	—	899,331	887,271	—	—	734,870	—	—	—	551,947	572,930	702,452	
⁹² U	1064,9	1032,9	961,42	920,62	908,74	786,79	755,14	753,07	739,3	734,6	724,85	568,0	591,3	720,911	
⁹¹ Pa	1088,5	—	—	942,7	930,9	806,2	—	772,1	—	753,0	743,7	—	—	—	
⁹⁰ Th	1112,8	1078,5	1009	965,85	954,05	826,46	793,94	791,92	775,2	772,8	763,6	603,9	629,3	760,0	
⁸⁸ Ra	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	670	802	
⁸³ Bi	1313,7	1269,3	1209,1	1153,01	1141,50	991,31	955,08	953,24	933,0	933,0	923,65	755,9	787,8	922,1	
⁸² Pb	1347,4	1305,0	1242,0	1184,08	1172,58	1019,06	980,83	980,83	959,5	960,3	950,77	781,2	814,3	949,2	
⁸¹ Tl	1381,9	—	—	1216,26	1204,93	1047,48	1010,0	1008,22	987,0	988,0	978,49	807,2	841,9	977,8	
⁸⁰ Hg	1418,41	—	—	1249,51	1238,63	1076,8	—	1037,70	—	1015,5	1006,7	834,2	870,8	1007,5	
⁷⁹ Au	1456,67	1410,0	1348,21	1285,02	1273,68	1108,79	1069,80	1068,01	1045,30	1047,79	1038,31	862,2	900,9	1038,2	
⁷⁸ Pt	1496,4	1449,0	—	1321,55	1310,33	1141,00	1101,6	1099,74	1076,9	1079,4	1070,21	891,4	932,1	1070,0	
⁷⁷ Ir	1530,9	1490,0	1429,5	1359,8	1348,47	1175,45	1134,8	1132,97	1109,1	1112,6	1103,57	922,3	965,4	1103,8	
⁷⁶ Os	—	—	—	1398,66	1388,59	1204,8	—	1168,84	—	—	1140	955,8	999,8	1139,0	
⁷⁵ Re	1627,3	—	—	1441,0	1429,97	1248,1	1205,7	1204,1	—	1183,3	1174,7	987,3	1035,4	1175,5	
⁷⁴ W	1674,75	1621,6	1561,0	1484,42	1473,37	1287,32	1243,80	1242,07	1216,23	1221,51	1213,01	1022,53	1072,15	1212,52	
⁷³ Ta	1724,9	1671,7	1608,6	1529,78	1518,85	1328,4	1283,8	1281,90	—	1261,3	1253,2	1057	1110,2	1251,7	
⁷² Hf	1774,4	—	—	1577,04	1566,07	1371,1	—	1323,5	—	1303,5	1296,7	1095,3	1151,5	1293,0	
⁷¹ Lu	1831,8	—	—	1626,36	1615,51	1414,3	—	1367,2	—	1345,9	1339,8	1136,21	1194,0	1337,5	
⁷⁰ Yb	1890	—	—	1678,9	1667,8	1462,7	—	1412,8	—	—	—	1176,4	1239,2	1382,64	
⁶⁹ Tm	1951,1	—	—	1733,9	1722,8	1511,5	—	1460,2	—	—	—	1219,6	1284,9	1429,9	
⁶⁸ Er	2015,1	—	—	1791,4	1780,4	1563,6	—	1510,6	—	1489,2	—	1265,5	1335,60	1479,19	
⁶⁷ Ho	2082,1	—	—	1852,1	1841,0	1618,8	—	1563,7	—	—	—	1314,6	1386,9	1532,2	
⁶⁶ Dy	2154,0	—	—	1915,96	1904,90	1677,7	—	1619,8	—	1595,7	—	1362	1435	1576	
⁶⁵ Tb	2229,0	—	—	1982,3	1971,5	1737,5	—	1679,0	—	1655,8	1656	1418,1	1498,1	1645,3	

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень L_{III})						Край поглощения		
	M_I	M_{IV}	M_V	N_I	N_V	O_I	L_I	L_{II}	L_{III}
⁶⁴ Gd	2307,1	2052,6	2041,9	1803,1	1741,9	1719,6	1474,0	1558,1	1706,0
⁶³ Eu	2390,3	2127,3	2116,3	1870,5	1808,2	1784	1533,3	1622,8	1771,7
⁶² Sm	2477	2205,7	2195,0	1942,2	1878,1	1852,3	1595,4	1699,1	1840,8
⁶¹ Pm	—	2287,9	2277,5	—	1951,8	—	—	—	—
⁶⁰ Nd	2670,3	2375,6	2365,3	2099,3	2031,4	2004,3	1731,7	1839,1	1990,7
⁵⁹ Pr	2778,1	2467,6	2457,7	2185,9	2114,8	2087,4	1807,1	1920,1	2072,8
⁵⁸ Ce	2885,7	2565,1	2556,0	2276,9	2204,1	2176,3	1885,6	2006,7	2159,5
⁵⁷ La	3000	2668,9	2659,7	2373,9	2298,0	2270	1968,9	2098,9	2253,7
⁵⁶ Ba	3128,7	2779,3	2769,6	2477,3	2399,4	2375,7	2063,5	2200,2	2358,0
⁵⁵ Cs	3260,1	2895,8	2886,2	2587,6	2506,4	2479,6	2162,8	2309,1	2468,9
⁵⁴ Xe	—	—	—	—	—	—	2269,1	2424,1	2587,2
⁵³ I	3550,20	3151,43	3142,14	2830,90	2744,89	—	2383,9	2547,5	2713,9
⁵² Te	3709,40	3291,70	3282,46	2964,80	2876,26	—	2505,4	2682,0	2849,6
⁵¹ Sb	3880,30	3441,33	3432,22	3108,75	3017,24	—	2634,1	2824,0	2993,9
⁵⁰ Sn	4063,25	3601,46	3592,61	3262,90	3168,79	—	2771,5	2976,3	3149,5
⁴⁹ In	4259,95	3772,98	3764,31	3429,00	3331,59	—	2919,8	3140,6	3317,7
⁴⁸ Cd	4470,95	3956,83	3948,30	3607,20	3506,99	—	3078,3	3319,0	3496,7
⁴⁷ Ag	4697,9	4154,30	4145,75	3800,10	3695,60	—	3247,4	3506,7	3690,8
⁴⁶ Pd	4942,3	4366,90	4358,80	4007,9	3900,8	—	3427,8	3716,3	3900,2
⁴⁵ Rh	5206,2	4596,00	4588,00	4233,0	4122,2	—	3618,60	3934,3	4121,3
⁴⁴ Ru	5492,3	4843,65	4835,75	4477,5	4362,7	—	—	4171,1	4360,1
⁴² Mo	6138,1	5403,15	5395,35	5038,4	4913,1	—	4289,7	4708,5	4902,6
⁴¹ Nb	6504,2	5720,1	5712,5	5350,3	5227,1	—	4571,7	—	5212,1
⁴⁰ Zr	6904,3	6065,3	6058,0	5698,4	5574,8	—	4857,4	5367,0	5571,6

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень L_I)			Конечный уровень (начальный уровень L_{II})			Конечный уровень (начальный уровень L_{III})				Край поглощения		
	M_{II}	M_{III}	$N_{II, III}$	M_I	M_{IV}	N_I	M_I	M_{IV}	M_V	N_I	L_I	L_{II}	L_{III}
⁸⁶ Y	6006,2	5970,8	5272,2	7026,1	6199,2	5863,3	7341,2	6442,5	6435,5	6081,7	5221,6	5737,3	5944,4
⁸⁸ Sr	6389,7	6354,4	5632,8	7501,6	6610,3	6283,5	7819,9	6855,6	6848,7	6505,7	5571,3	6662,1	6362,0
⁸⁷ Rb	6806,7	6773,6	6033,4	8024,7	7061,4	6741,4	8346,4	7310,1	7303,3	6969,8	5985,4	6630,0	6849,5
⁸⁵ Br	—	—	—	9235	8109	—	9564	—	8358	—	—	—	—
⁸⁴ Se	—	—	—	9939	8718	—	10 272	—	8972	—	7490,4	8389,7	8628,2
⁸³ As	8912	—	—	10 711	9395	—	11 048	—	9652	—	8090,8	9106	9348,2
⁸² Ge	—	—	—	11 587	10 174	—	11 922	—	10 435	—	—	—	—
⁸¹ Ga	—	—	—	12 595	11 023	—	12 950	—	11 290	—	—	—	—
⁸⁰ Zn	11 163	—	—	13 692	11 985	—	14 053	—	12 257	—	—	11837	12 106,4
²⁹ Cu	12 070	—	—	14 870	13 053	—	15 296	—	13 330	—	—	12 984,4	13 261,9
²⁸ Ni	13 120	—	—	16 280	14 279	—	16 708	—	14 566	—	—	—	—
²⁷ Co	14 240	—	—	18 000	15 657	—	18 297	—	15 968	—	—	—	—
²⁶ Fe	15 710	—	—	19 730	17 255	—	20 149	—	17 567	—	—	—	—

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень L_I)			Конечный уровень (начальный уровень L_{II})			Конечный уровень (начальный уровень L_{III})				Край поглощения		
	M_{II}	M_{III}	$N_{II, III}$	M_I	M_{IV}	N_I	M_I	M_{IV}	M_V	N_I	L	L_{II}	L_{III}
^{25}Mn	17 540		—	21 820	19 120	—	22 270	19 450		—	—	—	
^{24}Cr	—		—	24 290	21 280	—	24 790	21 670		—	—	—	
^{23}V	—		—	27 320	23 850	—	27 770	24 260		—	—	—	
^{22}Ti	—		—	30 880	27 020	—	31 360	27 390		—	—	26 290	
^{21}Sc	—		—	35 130	31 010	—	35 600	31 330		—	—	—	
^{20}Ca	—		—	40 460	35 950	—	40 960	36 320		—	—	35 630	
^{19}K	—		—	47 230	—	—	47 740	—		—	—	—	
^{18}Ar	—		—	—	—	—	—	—		—	—	50 100	
^{17}Cl	—		—	67 250	—	—	67 840	—		—	—	60 900	
^{16}S	—		—	79 290	—	—	79 980	—		—	—	75 700	
^{15}P	—	—	—	—	103 800	—	—	—	103 800	—	—	—	—
^{14}Si	—	—	—	—	135 500	—	—	—	135 500	—	—	—	125 500
^{13}Al	—	—	—	—	169 620	—	—	—	170 560	—	—	169 600	170 560
^{12}Mg	—	—	—	—	249 080	—	—	—	250 450	—	~ 200 000	249 000	250 250
^{11}Na	—	—	—	—	405 450	—	—	—	405 450	—	—	—	—

M-серия

Таблица 35.4

Диаграммные линии и края поглощения M-серии для элементов от U до Ni (длины волн даны в $\text{\AA}$ -единицах) [2]

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень M_I)	Конечный уровень (начальный уровень M_{II})			Конечный уровень (начальный уровень M_{III})				
	$N_{II, III}$	N_I	N_{IV}	O_{IV}	N_I	N_{IV}	N_V	O_I	$O_{IV, V}$
^{92}U	2,745	3,322	2,813	2,440	4,322	3,514	3,473	3,114	2,941
^{90}Th	2,938	—	3,006	2,613	4,554	3,710	3,672	—	3,124
^{88}Bi	3,732	—	3,829	—	5,526	4,560	4,522	4,096	3,926
^{82}Pb	3,864	—	3,964	—	5,694	4,705	4,665	4,235	4,063
^{81}Tl	4,005	—	4,110	—	5,870	4,855	4,815	—	4,207
^{79}Au	4,291	—	4,424	—	6,241	5,175	5,135	4,693	4,514
^{78}Pt	4,451	—	4,590	—	6,442	5,346	5,309	4,866	4,682
^{77}Ir	—	—	4,770	—	6,653	5,529	5,490	—	4,859
^{76}Os	—	—	4,944	—	—	5,712	5,670	—	—
^{75}Re	—	—	—	—	—	5,919	5,875	—	—
^{74}W	5,163	—	5,342	—	7,346	6,121	6,076	5,620	—
^{73}Ta	—	—	5,558	—	7,596	6,340	6,299	—	—
^{72}Hf	—	—	—	—	7,871	—	6,530	—	—
^{71}Lu	—	—	—	—	—	—	6,748	—	—
^{70}Yb	—	—	—	—	—	—	7,009	—	—
^{68}Er	—	—	—	—	—	—	7,530	—	—
^{67}Ho	—	—	—	—	—	—	7,849	—	—
^{66}Dy	—	—	—	—	—	—	8,127	—	—
^{64}Tb	—	—	—	—	—	—	8,468	—	—

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень M_I)			Конечный уровень (начальный уровень M_{II})			Конечный уровень (начальный уровень M_{III})			
	M_{II}	M_{III}	$N_{II, III}$	M_{IV}	N_I	N_{IV}	M_{IV}	M_V	N_I	N_V
^{64}Gd	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8,826
^{63}Eu	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9,192
^{62}Sm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9,580
^{60}Nd	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10,483
^{59}Pr	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10,975
^{58}Ce	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11,511
^{50}Sn	—	—	—	47,3	—	—	54,15	—	—	—
^{47}Ag	—	—	18,80	54,00	24,35	20,65	—	60,63	25,95	21,80
^{46}Pd	—	—	20,1	56,64	26,2	22,1	—	63,00	28,0	—
^{45}Rh	—	—	—	59,54	27,95	—	—	65,45	29,79	25,00
^{44}Ru	—	—	—	62,18	32,30	25,50	—	68,35	—	26,85
^{42}Mo	—	—	—	68,90	—	—	—	74,90	37,60	—
^{41}Nb	—	—	—	72,13	—	33,0	—	78,45	40,70	34,85
^{40}Zr	—	—	—	76,60	—	—	81,71	—	—	—
^{39}Y	—	—	—	81,50	—	—	86,50	—	48,50	—
^{38}Sr	—	—	—	85,93	51,32	—	91,38	—	53,61	—
^{37}Rb	—	—	—	91,51	57,04	—	96,69	—	59,48	—
^{35}Br	156,1	144,41	—	109,41	76,86	—	113,8	—	79,76	—

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень M_{IV})				Конечный уровень (начальный уровень M_V)					Край поглощения				
	N_{II}	N_{III}	$N_{VI, VII}$	$O_{II, III}$	N_{II}	N_{III}	N_{VI}	N_{VII}	O_{III}	M_I	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_V
^{92}U	5,040	4,615	3,708	3,570	4,937	3,914	3,902	—	—	2,228	2,385	2,877	2,327	3,491
^{90}Th	5,329	4,901	3,934	3,804	5,229	4,143	4,130	—	—	2,388	2,571	3,062	3,550	3,722
^{88}Bi	6,571	6,149	4,899	4,813	6,508	5,119	5,108	—	—	—	—	3,893	4,568	4,762
^{82}Pb	6,788	6,371	5,065	—	6,729	5,288	5,274	5,157	3,219	3,469	4,034	4,747	4,945	—
^{81}Tl	7,017	—	5,239	—	6,960	5,461	5,450	—	—	—	—	4,184	4,936	5,136
^{80}Hg	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4,340	5,139	5,331
^{79}Au	7,507	7,086	5,612	—	7,451	5,842	5,828	5,755	3,742	4,085	4,508	5,330	5,529	—
^{78}Pt	7,774	7,356	5,816	—	7,722	6,045	6,043	5,975	3,603	3,738	4,676	5,544	5,746	—
^{77}Ir	8,048	7,629	6,025	—	8,002	6,262	6,249	—	—	—	4,270	4,851	5,754	5,961

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень M_{IV})				Конечный уровень (начальный уровень M_V)					Край поглощения				
	N_{II}	N_{III}	$N_{VI, VII}$	$O_{II, III}$	N_{II}	N_{III}	N_{VI}	N_{VII}	O_{III}	M_I	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_V
⁷⁶ Os	8,342	—	6,254	—	8,293	—	6,477	—	—	4,037	4,412	5,027	5,975	6,194
⁷⁵ Re	8,646	8,222	6,491	—	8,611	—	6,715	—	—	—	—	—	—	—
⁷⁴ W	8,977	8,559	6,743	6,794	8,943	8,972	6,978	6,969	—	4,365	4,800	5,427	6,487	6,702
⁷³ Ta	9,311	—	7,008	7,083	9,297	—	7,237	—	—	—	—	—	6,764	6,991
⁷² Hf	9,666	—	7,289	—	9,666	—	7,524	—	—	—	—	—	—	—
⁷¹ Lu	—	—	7,583	—	10,047	—	7,824	—	—	—	—	—	—	—
⁷⁰ Yb	—	—	7,893	—	10,458	—	8,122	—	—	—	—	—	—	—
⁶⁸ Er	—	—	8,576	—	11,348	—	8,783	—	—	—	—	—	—	—
⁶⁷ Ho	—	—	8,947	—	11,839	—	9,143	—	—	—	—	—	—	—
⁶⁶ Dy	—	—	9,345	—	12,401	—	9,524	—	—	—	—	—	—	—
⁶⁵ Tb	—	—	9,772	—	12,949	—	9,917	—	—	—	—	—	—	—

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень M_{IV})			Конечный уровень (начальный уровень M_V)		Край поглощения			
	N_{II}	N_{III}	$N_{VI, VII}$	$N_{II, III}$	$N_{VI, VII}$	M_I	$M_{II, III}$	M_{IV}	M_V
⁶⁴ Gd	—	—	10,233	13,541	10,394	—	—	—	—
⁶³ Eu	—	—	10,723	14,191	10,932	—	—	—	—
⁶² Sm	—	—	11,238	—	11,406	—	—	—	—
⁶⁰ Nd	—	—	12,375	—	12,650	—	—	—	—
⁵⁸ Ce	—	—	13,755	—	14,030	—	—	—	—
⁵⁶ Ba	—	—	—	20,59	—	—	—	15,56	15,89
⁵³ I	—	—	—	—	—	—	—	19,66	—
⁵¹ Sb	—	28,76	—	28,76	—	—	—	—	—
⁵⁰ Sn	—	31,23	—	31,23	—	—	—	—	24,28
⁴⁸ Cd	—	36,75	—	36,75	—	—	—	—	28,13
⁴⁷ Ag	—	39,71	—	39,71	—	—	—	30,82	31,14
⁴⁶ Pd	—	43,36	—	43,36	—	—	—	—	—
⁴⁵ Rh	—	47,67	—	47,67	—	—	—	—	—
⁴⁴ Ru	—	52,34	—	52,34	—	—	—	—	—
⁴² Mo	—	64,36	—	64,36	—	—	—	—	—
⁴¹ Nb	—	72,20	—	72,20	—	—	—	—	—
⁴⁰ Zr	—	81,71	—	—	—	—	—	—	—
³⁹ Y	—	93,60	—	93,60	—	—	—	—	—
³⁷ Rb	127,84	126,71	—	128,66	—	—	—	—	—
³⁵ Br	191,04	186,97	—	192,57	—	—	—	—	—
³⁴ Se	—	—	—	—	—	—	—	—	227,76
²⁹ Cu	—	—	—	—	—	110,7	165,8	—	—
²⁸ Ni	—	—	—	—	—	—	188,4	—	—

N-серия

Таблица 35.5

Диаграммные линии N-серии для элементов от U до Cs (длины волн даны в Å) [2]

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень N_{IV})			Конечный уровень (начальный уровень N_V)			Конечный уровень (начальный уровень N_{VI})		Конечный уровень (начальный уровень N_{VII})
	N_{VI}	O_{II}	O_{III}	$N_{VI, VII}$	O_{II}	O_{III}	O_{IV}	O_V	O_V
⁹² U	31,78	—	—	34,81	—	—	42,08	—	42,08
⁹⁰ Th	33,57	—	—	36,32	—	—	49,53	48,18	50,00
⁸³ Bi	—	—	—	—	—	—	91,59	—	93,09
⁸² Pb	42,25	—	—	44,95	—	—	102,38	100,21	104,30
⁸¹ Tl	—	—	—	46,35	—	—	115,34	113,03	117,74
⁸⁰ Hg	43,6	—	—	46,4	—	—	—	—	—
⁷⁹ Au	46,9	—	—	49,4	—	—	—	—	—
⁷⁸ Pt	48,0	—	—	50,9	—	—	—	—	—
⁷⁷ Ir	50,1	—	—	52,8	—	—	—	—	—
⁷⁶ Os	51,8	—	—	54,6	—	—	—	—	—
⁷⁴ W	55,8	—	—	58,5	—	—	—	—	—
⁷³ Ta	58,1	—	—	61,0	—	—	—	—	—

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень N_{IV})			Конечный уровень (начальный уровень N_V)			Конечный уровень (начальный уровень N_{VI})		Конечный уровень (начальный уровень N_{VII})
	N_{VI}	O_{II}	O_{III}	$N_{VI, VII}$	O_{II}	O_{III}	O_{IV}	O_V	O_V
^{71}Lu	62,99	—	—	65,7	—	—	—	—	—
^{70}Yb	65,1	—	—	69,4	—	—	—	—	—
^{68}Er	72,7	—	—	76,3	—	—	—	—	—
^{66}Dy	—	97,2	—	83,37	—	—	—	—	—
^{65}Tb	—	102,23	—	86,76	—	—	—	—	—
^{63}Eu	—	112,0	—	—	—	—	—	—	—
^{62}Sm	—	118,12	—	—	—	—	—	—	—
^{60}Nd	—	129,0	—	—	—	—	—	—	—
^{59}Pr	—	136,5	—	—	—	—	—	—	—
^{58}Ce	—	144,4	—	—	144,4	—	—	—	—
^{57}La	—	152,62	—	—	152,62	—	—	—	—
^{56}Ba	—	163,25	159,06	—	—	164,60	—	—	—
^{55}Cs	—	188,60	183,8	—	—	190,3	—	—	—

35.4. ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛИНИЙ

Интенсивности линий рентгеновского излучения определяются силами осцилляторов и частотами соответствующих переходов, а также статистическими весами уровней атомов. Вычисление сил осцилляторов представляет собой очень трудоемкую задачу. Однако для относительных интенсивностей линий внутри одного мультиплета можно получить простые соотношения, воспользовавшись следующим правилом Бургера—Доргелло: если расщеплением начальных (конечных) уровней пренебречь, то суммы интенсивностей тех линий,

частоты которых окажутся одинаковыми, пропорциональны статистическим весам конечных (начальных) состояний. Отсюда, в частности, следует для отношения интенсивностей дублета $K_{\alpha_1}K_{\alpha_2}$:

$$I_{K_{\alpha_1}} : I_{K_{\alpha_2}} = 2 : 1,$$

что хорошо подтверждается экспериментом. Для линий триплета

$$L_{\beta_1}; \alpha_1; \alpha_2 : I_{L_{\alpha_1}} : I_{L_{\alpha_2}} : I_{L_{\beta_1}} = 9 : 1 : 5,$$

что также довольно близко к экспериментальным данным.

Таблица 35.6

Относительные интенсивности линий [2]

K-серия						L-серия							
Элемент	Конечный уровень					Элемент	Конечный уровень (начальный уровень L_I)						
	L_{III}	L_{II}	M_{III}	$N_{II, III}$	$M_{IV, V}$		M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_V	N_{II}	N_{III}	O_{III}
^{23}V	100	52,1	20,5	—	0,48	^{42}Mo	9,9	14,2	—	—	—	—	—
^{24}Cr	100	51,5	17,9	—	0,66	^{45}Rh	7,9	12,1	—	—	—	—	—
^{25}Mn	100	54,9	22,4	—	0,34	^{46}Pd	6,4	10,0	—	—	—	—	—
^{26}Fe	100	50,0	16,7	—	0,26	^{47}Ag	5,8	9,4	—	—	—	—	—
^{27}Co	100	49,7	16,0	—	0,23	^{73}Ta	6,4	7,4	—	0,4	2,0	2,7	0,8
^{28}Ni	100	49,5	18,7	—	0,20	^{74}W	5,2	8,2	0,5	0,5	1,5	2,0	0,6
^{29}Cu	100	49,7	20,0	—	0,15	^{78}Pt	5,2	8,2	—	—	—	—	—
^{30}Zn	100	50,3	20,7	0,36	—	^{90}Th	—	3,3	—	—	1,5	—	0
^{31}Ga	100	50,6	21,6	—	—	^{92}U	4,1	4,2	—	—	1,5	1,4	0
^{32}Ge	100	49,9	24,0	1,32	—	Конечный уровень (начальный уровень L_{II})							
^{33}As	100	49,2	21,7	0,69	—	Элемент		M_I	M_{IV}	N_I	N_{IV}	O_{IV}	
^{34}Se	100	50,3	28,0	1,07	—	^{42}Mo	—	62	—	—	6,8	—	
^{35}Br	100	50,9	22,2	1,73	—	^{45}Rh	—	61	—	—	7,7	—	
^{37}Rb	100	49,3	23,0	2,62	—	^{46}Pd	—	59	—	—	8,5	—	
^{38}Sr	100	50,3	27,4	4,16	—	^{47}Ag	—	59	—	—	12	—	
^{39}Y	100	50,0	23,3	3,19	—	^{73}Ta	1,2	57	0,6	—	11	0,2	
^{40}Zr	100	50,2	27,4	4,50	—	^{74}W	1,3	52	0,4	—	9	0,3	
^{41}Nb	100	49,8	27,9	4,90	—	^{78}Pt	1,5	51	—	—	11	—	
^{42}Mo	100	49,9	27,9	5,17	—	^{90}Th	1,8	52	0	—	14	3,9	
^{44}Ru	100	50,1	29,3	5,63	—	^{92}U	1,0	49,4	0	—	12	2,2	
^{45}Rh	100	50,3	27,9	5,78	—								
^{46}Pd	100	50,0	29,0	6,13	—								
^{47}Ag	100	49,9	29,0	6,17	—								
^{48}Cd	100	49,9	29,7	6,42	—								
^{49}In	100	49,9	29,6	6,47	—								
^{50}Sn	100	49,8	29,6	7,02	—								
^{51}Sb	100	50,3	31,0	7,08	—								
^{52}Te	100	49,7	30,6	7,35	—								
^{74}W	100	47,0	18,1	4,8	0,25								
^{78}Pt	100	52,0	20,0	7,8	0,38								

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень L_{III})						
	M_I	M_{IV}	M_V	N_I	N_V	O_I	$O_{IV, V}$
^{42}Mo	—	13	100	—	8	—	—
^{45}Rh	—	13	100	—	13	—	—
^{46}Pd	—	12	100	—	13	—	—
^{47}Ag	—	12	100	—	21	—	—
^{73}Ta	3,6	11	100	—	20	0,4	—
^{74}W	3,2	11,5	100	1,0	20	—	0,2
^{78}Pt	3,4	11,4	100	1,5	23	—	—
^{90}Th	3,6	12	100	1,4	26	0,5	—
^{92}U	2,4	11	100	1,6	28	—	—

35.5. ШИРИНА И ФОРМА ЛИНИЙ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ширина линии характеристического спектра рентгеновского излучения равна сумме ширины верхнего и нижнего уровней атома. Полная ширина уровня определяется радиационными и безрадиационными (эффект Оже) переходами. Оже-переходы какого-либо определенного типа возможны только в том случае, если энергия перехода превышает энергию связи конвертируемого элект-

рона. Поэтому на кривой зависимости ширины данной линии от Z появляются изломы.

Теоретическая форма линии имеет симметричный вид относительно максимума интенсивности. Однако для ряда элементов форма линии несимметрична. Особенно сильна асимметрия у элементов переходной группы железа. Такая асимметрия линии объясняется спин-спиновым взаимодействием $2p$ -электронов с электронами незаполненной $3d$ -оболочки [3]. Это взаимодействие приводит к расщеплению $2p$ -уровня, несимметричному относительно начального положения $2p$ -уровня. Так как расщепление меньше полной ширины каждого из подуровней, то форма результирующей линии становится асимметричной. Аналогичная картина асимметрии линий рентгеновского излучения наблюдается в некоторых химических соединениях и сплавах и связана с характером химических связей [3].

Количественно асимметрию линий характеризуют индексом асимметрии a , равным отношению длинноволнового отрезка α ширины линии к коротковолновому отрезку β (рис. 35.1):

$$a = \alpha/\beta.$$

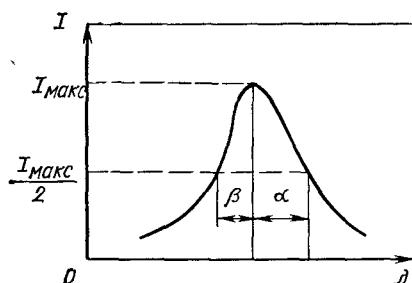


Рис. 35.1. Схема, поясняющая индексы асимметрии рентгеновской линии.

Таблица 35.7

Ширина линий K -серии на середине ординаты максимума интенсивности [2]

Элемент	Переход				Элемент	Переход			
	$K-L_{III}$		$K-L_{II}$			$K-L_{III}$		$K-L_{II}$	
	$\Delta\lambda, \text{X}$	$\Delta E, \text{эв}$	$\Delta\lambda, \text{X}$	$\Delta E, \text{эв}$		$\Delta\lambda, \text{X}$	$\Delta E, \text{эв}$	$\Delta\lambda, \text{X}$	$\Delta E, \text{эв}$
^{20}Ca	1,60	1,76	1,50	1,69	^{82}Ge	0,43	3,4	0,46	3,7
^{22}Ti	1,22	2,00	1,43	2,33	^{88}Sr	0,35	5,7	0,36	5,8
^{23}V	1,15	2,26	1,35	2,67	^{90}Zr	0,33	6,6	0,35	6,9
^{24}Cr	1,03	2,22	1,23	2,89	^{91}Nb	0,33	7,4	0,31	6,9
^{25}Mn	1,10	3,09	1,22	3,43	^{92}Mo	0,29	7,2	0,32	7,7
^{26}Fe	1,01	3,34	1,12	3,60	^{94}Ru	0,29	8,7	0,29	8,6
^{27}Co	0,81	3,1	0,95	3,7	^{95}Rh	0,29	9,5	0,29	9,4
^{28}Ni	0,68	3,07	0,85	3,78	^{96}Pd	0,28	10,1	0,29	10,3
^{29}Cu	0,58	3,0	0,77	4,0	^{97}Ag	0,28	11,1	0,29	11,3
^{30}Zn	0,51	3,1	0,58	3,5	^{98}W	0,152	43,0	0,153	43,3

Ширина линий L-серии

Элемент	Переход											
	$L_I - M_{II}$		$L_I - M_{III}$		$L_I - N_{II}$		$L_I - N_{III}$		$L_I - O_{III}$		$L_{II} - M_{IV}$	
	$\Delta\lambda, X$	$\Delta E, эв$	$\Delta\lambda, X$	$\Delta E, эв$	$\Delta\lambda, X$	$\Delta E, эв$	$\Delta\lambda, X$	$\Delta E, эв$	$\Delta\lambda, X$	$\Delta E, эв$	$\Delta\lambda, X$	$\Delta E, эв$
⁴⁷ Ag	7,1	5,9	7,9	6,6	9,7	11,0	9,0	10,2	—	—	3,0	2,4
⁷³ Ta	2,25	14,1	1,61	11,7	1,15	11,6	0,99	10,0	—	—	0,94	6,6
⁷⁴ W	2,22	15,1	1,59	12,3	1,12	12,1	1,00	11,0	1,40	16,2	0,85	6,5
⁷⁵ Re	2,10	16,4	1,63	13,6	1,14	13,2	1,02	12,0	—	—	0,81	6,5
⁷⁶ Os	2,05	17,1	1,65	14,7	1,13	14,0	1,00	12,6	—	—	0,76	6,6
⁷⁷ Ir	1,98	17,7	1,56	14,9	1,10	14,6	0,99	13,3	—	—	0,73	6,8
⁷⁸ Pt	2,05	19,4	1,70	17,2	—	—	1,09	15,6	—	—	0,84	8,3
⁷⁹ Au	2,05	20,7	1,70	18,4	1,20	18,1	1,07	16,4	—	—	0,81	8,5
⁸¹ Tl	1,89	21,6	1,60	19,7	1,12	19,3	1,02	17,8	—	—	0,75	9,0
⁸² Pb	1,83	22,2	1,39	18,3	1,08	19,9	1,04	19,4	—	—	0,66	8,4
⁸³ Bi	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,70	9,6
⁹² U	1,46	32,2	0,77	18,8	1,17	39,4	0,94	32,4	—	—	0,60	14,3

Элемент	Переход													
	$L_{II} - N_{IV}$		$L_{II} - O_{IV}$		$L_{III} - M_{IV}$		$L_{III} - M_{V}$		$L_{III} - N_{I}$		$L_{III} - N_{V}$		$L_{III} - O_{IV,V}$	
	$\Delta\lambda, X$	$\Delta E, эв$	$\Delta\lambda, X$	$\Delta E, эв$	$\Delta\lambda, X$	$\Delta E, эв$	$\Delta\lambda, X$	$\Delta E, эв$	$\Delta\lambda, X$	$\Delta E, эв$	$\Delta\lambda, X$	$\Delta E, эв$	$\Delta\lambda, X$	$\Delta E, эв$
⁴⁷ Ag	2,88	3,95	—	—	—	—	4,5	3,2	—	—	3,00	3,72	—	—
⁷³ Ta	0,99	9,5	—	—	—	—	—	—	—	—	1,31	9,8	—	—
⁷⁴ W	0,91	9,3	0,62	7,0	—	—	1,26	7,2	—	—	1,23	9,8	0,65	6,5
⁷⁵ Re	0,87	9,5	—	—	—	—	—	—	—	—	1,23	9,8	—	—
⁷⁶ Os	0,80	9,4	—	—	—	—	—	—	—	—	1,10	9,9	—	—
⁷⁷ Ir	1,12	9,6	—	—	—	—	1,19	8,1	—	—	1,01	9,7	—	—
⁷⁸ Pt	0,85	11,4	—	—	—	—	1,17	8,4	—	—	1,09	11,1	—	—
⁷⁹ Au	0,80	11,5	—	—	—	—	1,13	8,6	—	—	1,04	11,2	—	—
⁸¹ Tl	0,71	11,7	—	—	—	—	1,11	9,4	—	—	0,95	11,5	—	—
⁸² Pb	0,65	11,4	—	—	—	—	1,05	9,5	—	—	0,92	11,8	—	—
⁸³ Bi	0,67	12,5	—	—	—	—	1,03	9,8	—	—	0,90	12,1	—	—
⁹² U	0,49	15,9	0,47	16,4	0,99	14,4	0,88	13,1	0,97	19,4	0,74	16,1	0,50	11,9

Ширина линий M-серии

Элемент	Переход	$\Delta\lambda, X$	$\Delta E, эв$	Элемент	Переход	$\Delta\lambda, X$	$\Delta E, эв$
³⁸ Sr	$M_V - N_{II, III}$	2,02	1,99	⁴⁷ Ag	$M_{II} - M_{IV}$	0,9	3,8
⁴⁰ Zr	$M_V - N_{II, III}$	1,17	2,06	⁴⁷ Ag	$M_{III} - M_V$	1,1	3,7
⁴¹ Nb	$M_V - N_{II, III}$	1,45	3,44	⁴⁷ Ag	$M_{II} - N_{IV}$	0,26	7,5
⁴² Mo	$M_V - N_{II, III}$	1,02	3,05	⁴⁸ Cd	$M_V - N_{II, III}$	1,65	14,8
⁴⁴ Ru	$M_V - N_{II, III}$	0,85	3,79	⁵⁰ Sn	$M_V - N_{II, III}$	1,32	16,4
⁴⁵ Rh	$M_V - N_{II, III}$	0,84	4,57	⁵¹ Sb	$M_V - N_{II, III}$	1,26	18,5
⁴⁶ Pd	$M_V - N_{II, III}$	1,03	6,74	⁵² Te	$M_V - N_{II, III}$	1,07	18,5
⁴⁷ Ag	$M_{III} - N_V$	0,33	8,6	⁵⁶ Ba	$M_V - N_{II, III}$	0,24	7,0
⁴⁷ Ag	$M_V - N_{II, III}$	1,45	13,6	⁵⁷ La	$M_V - N_{II, III}$	0,27	9,1
				⁵⁸ Ce	$M_V - N_{II, III}$	0,28	10,6

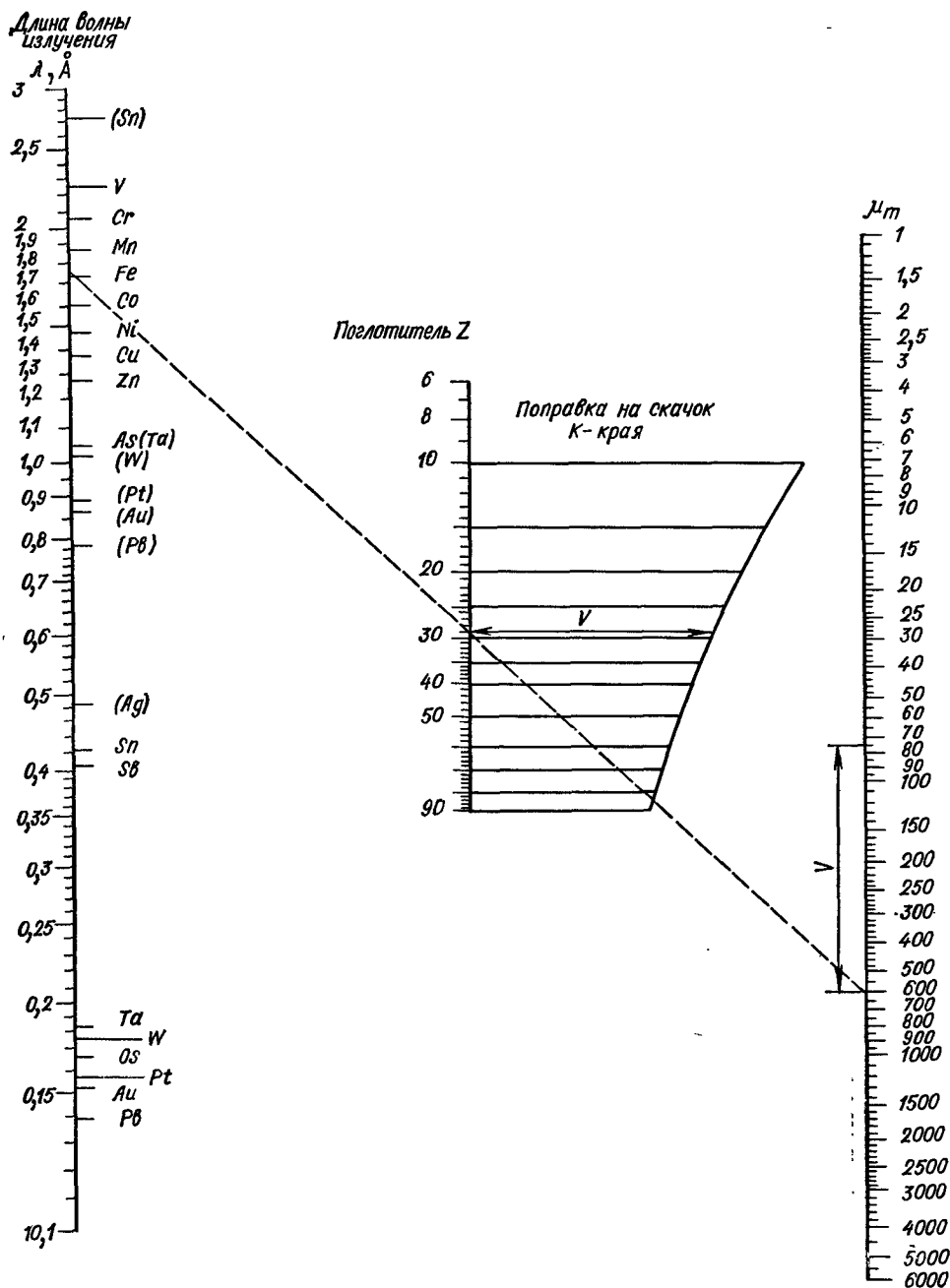


Рис. 35.2. Номограмма для определения массового коэффициента ослабления μ_m [2].

Элемент	$MV - N_{VII}$		$MV - N_{VI}$		$MIV - N_{VI, VII}$		$MIII - N_V$		$MIV - N_{III}$		$MIV - O_{II, III}$		$MV - N_{II}$		$MV - N_{III}$		$MIII - N_I$	
	$\Delta\lambda, \text{X}$	$\Delta E, \text{эВ}$	$\Delta\lambda, \text{X}$	$\Delta E, \text{эВ}$	$\Delta\lambda, \text{X}$	$\Delta E, \text{эВ}$	$\Delta\lambda, \text{X}$	$\Delta E, \text{эВ}$	$\Delta\lambda, \text{X}$	$\Delta E, \text{эВ}$	$\Delta\lambda, \text{X}$	$\Delta E, \text{эВ}$	$\Delta\lambda, \text{X}$	$\Delta E, \text{эВ}$	$\Delta\lambda, \text{X}$	$\Delta E, \text{эВ}$	$\Delta\lambda, \text{X}$	$\Delta E, \text{эВ}$
⁷⁴ W	6,6	1,68	1,2	0,31	7,85	2,14	18,0	6,0	4,97	0,84	10,9	3,01	80,5	12,5	13,3	2,3	—	—
⁷⁷ Ir	7,7	2,5	—	—	6,5	2,2	23,0	9,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
⁷⁸ Pt	5,8	2,0	—	—	5,3	1,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
⁷⁹ Au	6,8	2,5	6,4	2,5	18,0	8,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	32	10,0	—

Таблица 35.8

Индексы асимметрии [2]

Элемент	K_{α_1}	K_{α_2}	Элемент	K_{α_1}	K_{α_2}	Элемент	K_{α_1}	K_{α_2}
¹⁷ Cl	0,9	1,0	²⁵ Mn	1,5	1,3	³¹ Ga	1,0	1,2
¹⁹ K	1,0	1,0	²⁶ Fe	1,6	1,3	³² Ge	1,0	1,1
²¹ Sc	1,0	1,0	²⁷ Co	1,4	1,3	³⁵ Br	1,0	1,1
²² Ti	1,2	1,0	²⁸ Ni	1,2	1,3	³⁸ Sr	1,0	1,1
²³ V	1,2	1,1	²⁹ Cu	1,2	1,3	⁴⁰ Zr	1,0	1,1
²⁴ Cr	1,4	1,0	³⁰ Zn	1,1	1,3	⁴² Mo	1,0	1,0

35.6. ПОГЛОЩЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

Поглощение рентгеновского излучения в веществе сопровождается образованием фотоэлектронов, оже-электронов и испусканием атомами вещества вторичных фотонов. Ослабление интенсивности рентгеновского излучения происходит по экспоненциальному закону:

$$I(x) = I_0 \exp(-\mu x).$$

Здесь $I(x)$ — интенсивность рентгеновского излучения на расстоянии x от поверхности вещества; I_0 — интенсивность на поверхности; $\mu, \text{см}^{-1}$ — линейный коэффициент ослабления.

Так как энергия рентгеновского излучения намного превосходит энергию химической связи, то поглощение рентгеновского излучения атомами вещества происходит независимо. Если вещество состоит из атомов одного сорта, то полезно ввести массовый коэффициент ослабления $\mu_m = \mu/\rho$, где ρ — плотность, г/см^3 .

На рис. 35.2 приведена построенная по экспериментальным данным номограмма, позволяющая определять μ_m в зависимости от Z — атомного номера поглощающих атомов и λ — длины волны излучения. Следует иметь в виду, что коэффициент поглощения как функция длины волны λ испытывает скачки при λ , равной λ_K , λ_{L_1} и т. д., где λ_K , λ_{L_1} ... — длины волн краев поглощения K -, L -серий. Край поглощения определяется переходом из данного уровня на первый из незаполненных уровней, для которого выполняется условие дипольного поглощения. Значения краев поглощения для различных элементов приведены в табл. 35.2—35.4. Физически эти скачки в μ_m связаны с тем, что при $\lambda < \lambda_K$

фотоэффект может происходить на всех электронах атома, при $\lambda > \lambda_K$ из игры исключаются электроны K -оболочки. Аналогичная картина имеет место при $\lambda = \lambda_L$. Поправки на эти скачки также приведены на диаграмме рис. 35.2, штриховая линия на которой иллюстрирует нахождение μ_m для поглощения $K\beta_1$ линии железа с длиной волны $1,753 \text{ \AA}$ в меди ($Z = 29$). Через точки $\lambda = 1,753 \text{ \AA}$ и $Z = 29$ проводим линию до пересечения с осью μ_m . Это дает значение для μ_m , равное 600. По табл. 35.2 и 35.3 определяем, что рассматриваемая длина волны лежит между краями поглощения K - и L_1 -серий в меди. Поправка на скачок K -края, измеряемая горизонтальным отрезком V , против значения $Z = 29$, откладывается вверх от цифры 600; получающаяся точка 75 дает истинное значение μ_m .

Для сложного химического вещества линейный коэффициент поглощения может быть выражен через весовые концентрации C_i и массовые коэффициенты ослабления $(\mu_m)_i$ элементов, образующих данное соединение:

$$\mu = \rho \sum_i C_i (\mu_m)_i. \quad (7)$$

Здесь ρ — плотность сложного вещества, г/см^3 . Суммирование производится по всем элементам, входящим в сложную молекулу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рентгеновские лучи. Пер. с нем. и англ. Под ред. М. А. Блохина. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
2. Блохин М. А. Физика рентгеновских лучей. М., Гостехтеориздат, 1953.
3. Вайнштейн Э. Е. Рентгеновские спектры атомов в молекулах химических соединений и в сплавах. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1950.

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

36.1. ВВЕДЕНИЕ

Элементарными в традиционном смысле этого слова следовало бы называть самые простые, неделимые частицы материи. Однако подавляющее большинство частиц, которые относят к разряду элементарных, не удовлетворяют этому критерию, так как они нестабильны и в результате распада превращаются в другие элементарные частицы. Такая нестабильность не означает, что распадающиеся элементарные частицы состоят из конечных продуктов своего распада, которые можно было бы тогда считать истинно элементарными частицами. Это видно уже из того факта, что схемы распада многих элементарных частиц, а следовательно и конечные продукты распада, могут быть разными. Как известно, традиционное понятие элементарности не применимо к тому, что принято называть элементарными частицами, поэтому в настоящее время существует скорее не определение того, что такое элементарные частицы, а правило, по которому в разряд элементарных частиц относят все мельчайшие частицы материи, за исключением атомных ядер с массовым числом больше единицы.

36.2. ОСНОВНЫЕ ГРУППЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

В зависимости от того, в каких взаимодействиях участвуют элементарные частицы, их разбивают [1] на три основные группы. Самая большая группа — *адроны* — элементарные частицы, участвующие в сильных взаимодействиях. Адроны разделяются на мезоны, частицы с целочисленным значением спина, и барионы, частицы с полуцелым значением спина. Вторую группу — группу *лептонов* образуют частицы, участвующие только в слабом и электромагнитном взаимодействиях. Третья группа состоит из одного *фотона*, участвующего только в электромагнитном взаимодействии.

Строгие квантовые числа элементарных частиц сохраняются во всех взаимодействиях. К их числу относятся:

электрический заряд — величина, кратная для всех частиц заряду электрона;

электронный лептонный заряд $l_e = 1$ для электрона e^- и электронного нейтрино ν_e и $l_e = -1$ для позитрона e^+ и электронного антинейтрино $\bar{\nu}_e$. Для остальных частиц $l_e = 0$;

мюонный лептонный заряд $l_\mu = 1$ для μ^- и ν_μ и $l_\mu = -1$ для μ^+ и $\bar{\nu}_\mu$. Для остальных частиц $l_\mu = 0$. Различие электронного и мюонного лептонных зарядов определяет два типа нейтрино (ν_e и ν_μ);

барионный заряд B , равный 1 для барионов и -1 для антибарионов. Для остальных элементарных частиц $B = 0$. Сохранение барионного заряда означает, что во всех ядерных реакциях любое изменение полного числа барионов должно сопровождаться точно таким же изменением полного числа антибарионов;

спин J — величина, характеризующая внутренний момент количества движения. Сохранение спина связано со свойством изотропности пространства по всем направлениям.

Нестрогие квантовые числа элементарных частиц сохраняются только при определенных взаимодействиях. К их числу относятся: изотопический спин, гиперзаряд, пространственная и зарядовая четности, G -четность и квантовое число A .

Изотопический спин I определяет число частиц в одном зарядовом мультиплете. Сильные взаимодействия элементарных частиц обладают свойством инвариантности относительно величины изотопического спина. Слабое и электромагнитное взаимодействия нарушают симметрию в изотопическом пространстве, поэтому изотопический спин перестает быть строгим квантовым числом.

Странность S была введена для объяснения экспериментально наблюдаемого множественного (ассоциативного) рождения гиперонов и K -мезонов. В сильных взаимодействиях имеет место закон сохранения странности [1, 2]. Это в частности приводит к тому, что гипероны и K -мезоны стабильны по отношению к сильным распадам и могут распадаться только в результате слабых взаимодействий, нарушающих закон сохранения странности. Максимальное значение $|S|$ для известных в настоящее время элементарных частиц равно трем.

Гиперзаряд Y определяется как сумма $B + S$, он связан с зарядом Q и величиной I_3 соотношением Гелл-Мана—Нишиджимы: $Q = I_3 + Y/2$.

Пространственная четность P определяется характером преобразования волновой функции элементарных частиц при зеркальном отражении. Собственные значения оператора отражения P определяют обычно, исходя из того, что двойное отражение есть тождественное преобразование, т. е. $P^2 = 1$.

Зарядовая четность C определяется как собственное значение оператора зарядового сопряжения. Этот оператор антикоммутирует с оператором полного заряда системы. Поэтому только состояния с полным зарядом, равным нулю, могут обладать определенным значением зарядовой четности. В слабых взаимодействиях происходит нарушение законов сохранения P - и C -четностей. Однако «обычные» слабые взаимодействия обладают CP -инвариантностью (закон сохранения комбинированной четности).

В 1964 г. было обнаружено, что наряду с «обычным» CP -инвариантным распадом $K_L \rightarrow 3\pi$ с малой вероятностью (порядка 0,2%) происходит распад $K_L \rightarrow 2\pi$, в котором CP -четность нарушается. Возможно, что CP -неинвариантное взаимодействие «сверхслабое» и тогда оно может проявляться практически только в распадах каонов. Это связано с исключительно малой разницей масс нейтральных каонов — K_S и K_L , для которых CP -четности различны.

G-четность определяется как собственное значение оператора G -четности, равного $\text{Sehr} (i\pi I_y)$ [3]. Она определена только для сильно взаимодействующих нестранных частиц с нулевым барионным зарядом, тем самым это могут быть либо π - и η -мезоны, либо образования элементарных частиц с S и B , равными нулю. G -четность сохраняется только в сильных взаимодействиях. В отличие от C -четности она имеет определенное значение и для заряженных членов изотопического мультиплетта. Сохранение G -четности накладывает целый ряд запретов в сильных распадах элементарных частиц.

Квантовое число A введено для объяснения некоторых эмпирических правил отбора в распадах мезонов. Приближенный характер A -инвариантности распадов мезонов связан с тем, что учет роли виртуальных барионов в этих распадах приводит к нарушению A -инвариантности. Однако это нарушение может быть малым, так как порог рождения пары барион — антибарион относительно велик [4].

36.3. УНИТАРНАЯ СИММЕТРИЯ И СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ МАССАМИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Унитарная симметрия элементарных частиц может рассматриваться как обобщение симметрии в изотопическом пространстве. Основой изотопической симметрии является инвариантность сильных взаимодействий относительно преобразований в пространстве изотопического спина. Близость масс изотопических мультиплетов, различающихся только значением гиперзаряда Y , позволяет сделать предположение, что сильное взаимодействие состоит из собственно сильного взаимодействия и умеренно сильного взаимодействия. Собственно сильное взаимодействие допускает более высокую симметрию — унитарную симметрию элементарных частиц, которая включает в одну группу (супермультиплет) элементарные частицы, относящиеся к разным значениям I и Y . Умеренно сильное взаимодействие нарушает унитарную симметрию, снимая вырождение по массам внутри супермультиплетов.

При симметрии в изотопическом пространстве сохраняются две величины I^2 , I_3 , а изотопические мультиплеты даются неприводимыми представлениями группы $SU(2)$. При унитарной симметрии сохраняются уже три величины: I^2 , I_3 , Y , а унитарные супермультиплеты даются неприводимыми представлениями группы $SU(3)$ [5].

Наинизшим физически возможным (т. е. имеющим целочисленные значения Y) неприводимым представлением группы $SU(3)$ является октет, которому ставят в соответствие восемь барионов p , n , Λ^0 , Σ^+ , Σ^- , Σ^0 , Ξ^- , Ξ^0 .

Из октетов строятся неприводимые представления более высокого ранга, например первые два: декуплет и 27-плет. Декуплет образуют барионные резонансы с $J^P = \frac{3}{2}^+$, а также Ω^- -гиперон. Барионные резонансы с $J^P = \frac{5}{2}^+$ и $J^P = \frac{7}{2}^+$ группируются в октет ($J^P = \frac{5}{2}^+$) и декуплет ($J^P = \frac{7}{2}^+$). Аналогично строятся унитарные супермультиплеты для мезонов и мезонных резонансов.

Преобразования группы $SU(3)$ можно рассматривать как преобразование в пространстве унитарного спина U . Каждому супермультиплету соответствует определенное значение унитарного спина, при этом величина $2U + 1$ равна числу различных значений гиперзаряда Y в данном супермультиплете. Для октетов $U = 1$, для декуплетов $U = \frac{3}{2}$.

Таблица 36.1

Унитарные супермультиплеты элементарных частиц [8]
Октеты

Y	I	I_3	Барионы $J^P = \frac{1}{2}^+$	Мезоны $J^P = 0^-$	Мезоны $J^P = 1^-$
1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	p	K^+	K^{*+}
1	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	n	K^0	K^{*0}
0	1	1	Σ^+	π^+	ρ^+
0	1	0	Σ^0	π^0	ρ^0
0	1	-1	Σ^-	π^-	ρ^-
0	0	0	Λ	η	φ
-1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	Ξ^0	$\bar{K}^0$	$\bar{K}^{*0}$
-1	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	Ξ^-	K^-	K^{*-}

1

Декуплет барионов $J^P = \frac{3}{2}^+$

Частица	I_3	I	Y
Δ^{++}	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$	1
Δ^+	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}$	1
Δ^0	$-\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}$	1
Δ^-	$-\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$	1
Y_1^{*+}	1	1	0
Y_1^{*0}	0	1	0
Y_1^{*-}	-1	1	0
Ξ^{*0}	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	-1
Ξ^{*-}	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	-1
Ω^-	0	0	-2

Расщепление по массам элементарных частиц внутри супермультиплетта получают, сделав простейшее предположение, что умеренно сильное взаимодействие компонент супермультиплетта в вакууме описывается неким эффективным постоянным полем. Квантовыми числами, характеризующими такое расщепление, являются Y и $I(I+1) - Y^2/4$. Тогда для масс барионов, входящих в супермультиплет, справедливо соотношение

$$m = m_0 + \Delta m_1 Y + \Delta m_2 [I(I+1) - Y^2/4]. \quad (36.1)$$

Отсюда следует, что массы барионов, входящих в октет, связаны условием

$$2(m_E + m_N) = m_\Sigma + 3m_\Lambda. \quad (36.2)$$

Здесь m_i — масса покоя i -й элементарной частицы.

Из (36.1) для барионного декуплета следует условие эквидистантности масс

$$m_\Omega - m_E = m_E - m_{Y^*} = m_{Y^*} - m_\Delta. \quad (36.3)$$

По аналогичной схеме получают соотношение между квадратами масс элементарных частиц, входящих в мезонные октеты;

$$4m_K^2 = m_\pi^2 + 3m_\eta^2. \quad (36.4)$$

Формулы (36.2)—(36.4) очень хорошо согласуются с экспериментом. Исключение представляет только октет векторных мезонов (ϕ , K^* , ρ), для которого согласие хуже.

36.4. СИМВОЛИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Помимо обычных, «разговорных», наименований элементарных частиц, которые приводятся в таблицах в колонке «Частица», существует предложенная Чу, Гелл-Маном и Розенфельдом [6] символика мезонов и барионов, обеспечивающая группировку элементарных частиц по изотопическому спину и гиперзаряду. В табл. 36.2 и 36.3 приведены символы барионов и мезонов в зависимости от I и Y , объединенных в унитарные супермультиплеты. Дополнительные обозначения, которые записываются в виде индексов у символа элементарной частицы, обеспечивают группировку частиц по значению четности и спина, а также связывают частицы, расположенные на одной траектории Редже [7]. Правила, по которым вводится индекс у символов барионов и мезонов, приведены в табл. 36.3. Например, протон и нейтрон, для которых $I = 1/2$; $Y = 1$; $J^P = 1/2^+$ обозначаются символом N_α (или N_α^I).

Таблица 36.2

Символы мезонов и мезонных резонансов * [8]

I	Y		
	$+1$	0	-1
0		η	
$1/2$	K		$\bar{K}$
1		π	

I	Y			
	$+1$	0	-1	-2
0		Λ		Ω
$1/2$	N		Σ	Ξ
1		Σ	Ξ	
$3/2$	Δ			

* Штриховой линией показаны частицы, объединяющиеся в унитарный октет. Штрих-пунктирная линия показывает объединение частиц в унитарный декуплет.

Таблица 36.3

Индексы у символов барионов и мезонов [8]

Частица	Индекс	верхний	I	II	I	II	I	II	I	II
		нижний	α	α	β	β	γ	γ	δ	δ
Барион	J^P		1^+	5^+	1^-	5^-	3^-	7^-	3^+	7^+
			2	2	2	2	2	2	2	2
Мезон	J^P		0^+	2^+	0^-	2^-	1^-	3^-	1^+	3^+

36.5. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ, СТАБИЛЬНЫЕ ПО ОТНОШЕНИЮ К СИЛЬНЫМ РАСПАДАМ

Приведенные в табл. 36.4 погрешности измерений, как правило, представляют собой среднеквадратические отклонения. Если приведенное значение получено в результате обработки данных различных экспериментов и погрешности измерений распределены не по нормальному закону, то истинное значение погрешности есть вычисленная погрешность, умноженная на приводимый в таблице множитель S («шкала»).

Q — значение выделяемой при распаде энергии;
 P — наибольшее возможное значение импульса частиц;
 c — скорость света.

Характеристики элементарных частиц, стабильных по отношению к сильным распадам [9, 10]

Класс	Частица	Квантовые числа $I (J^{PG}) C$	Масса покоя, $M_{эв}$	Разность масс, $M_{эв}$	Среднее время жизни, $сек$	Каналы распада			
						Схема распада	Относительная вероятность, %	$Q, M_{эв}$	$P, \frac{M_{эв}}{c}$
Фотон	γ	$(1^-) C^-$	$0 (< 2 \cdot 10^{-21})$	—	Стабилен	—	—	—	—
Лептоны	ν_e	$\left(\frac{1}{2}\right)$	$0 (< 60 эв)$	—	Стабильны	—	—	—	—
	ν_μ	$\left(\frac{1}{2}\right)$	$0 (< 1,2)$	—	Стабильны	—	—	—	—
	$e^\mp$	$\left(\frac{1}{2}\right)$	$0,5110034 \pm$ $\pm 0,0000014$	—	Стабильны	—	—	—	—
	$\mu^\mp$	$\left(\frac{1}{2}\right)$	$105,65948 \pm$ $\pm 0,00035$	$m_{\pi^\pm} - m_{\mu^\pm} =$ $= 33,909 \pm$ $\pm 0,006$	$(2,1994 \pm$ $\pm 0,0006) 10^{-6},$ $S = 2,2$	$e \nu_\mu \bar{\nu}_e$ $e \gamma \gamma$ $3e$ $e \gamma$	100 $< 1,6 \cdot 10^{-5}$ $< 6 \cdot 10^{-9}$ $< 2,2 \cdot 10^{-8}$	105,15	52,8
Мезоны	$\pi^\pm$	$1(0^{--}) C_n^-$	$139,5688 \pm$ $\pm 0,0064$	$m_{\pi^\pm} - m_{\pi^0} =$ $= 4,6043 \pm$ $\pm 0,0037$	$(2,6030 \pm$ $\pm 0,0023) 10^{-8}$	$\mu \nu_\mu$ $e \nu_e$ $\mu \nu_\mu \gamma$ $\pi^0 e \nu_e$ $e \nu_e \gamma$ $e \nu_e^+ e^-$	100 $(1,24 \pm 0,03) 10^{-4}$ $(1,24 \pm 0,25) 10^{-4}$ $(1,01 \pm 0,09) 10^{-8}$ $(3,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-8}$ $< 3,4 \cdot 10^{-8}$	33,92 139,07 33,92 4,09 — —	29,80 69,80 29,80 4,50 70 70
	π^0	$1(0^{--}) C_n^-$	$134,9645 \pm$ $\pm 0,0074$		$(0,84 \pm 0,10) 10^{-16},$ $S = 1,6$	$\gamma \gamma$ $\gamma e^+ e^-$ $\gamma \gamma \gamma$ $e^+ e^- e^+ e^-$ $\gamma \gamma \gamma \gamma$	98,8 $1,19 \pm 0,05$ $< 5 \cdot 10^{-6}$ $(3,2 \pm 0,3) 10^{-5}$ $< 6,1 \cdot 10^{-5}$	135,00 133,95 — — —	67,50 67,49 — — 67

Класс	Частица	Квантовые числа $I (J^{PG}) C$	Масса покоя, $M_{эв}$	Разность масс, $M_{эв}$	Среднее время жизни, сек	Каналы распада				
						Схема распада	Относительная вероятность, %	$Q, M_{эв}$	$\frac{M_{эв}}{P, c}$	
Мезоны	$K^\pm$	$\frac{1}{2} (0^-)$	$493,707 \pm 0,037$	$m_{K^0} - m_{K^\mp} = 3,99 \pm 0,13$ $S = 1,1$	$(1,2371 \pm 0,0026) 10^{-8},$ $S = 1,2$	$\mu^\pm \nu_\mu$ $\pi^+ \pi^0$ $\pi^+ \pi^+ \pi^-$ $\pi^\pm \pi^0 \pi^0$ $\pi^0 \mu^\pm \nu_\mu$ $\pi^0 e^\pm \nu_e$ $\pi^\pm \pi^\mp e^\pm \nu_e$ $\pi^\pm \pi^\pm e^\mp \nu_e$ $\pi^\pm \pi^0 \gamma$ $\pi^\pm \pi^\mp \mu^\pm \nu_\mu$ $\pi^\pm \mu^+ \mu^-$ $\pi^\pm e^+ e^-$ $e^\pm \nu_e$ $\pi^+ \pi^+ \pi^- \gamma$	$63,54 \pm 0,19$ $21,12 \pm 0,17$ $5,59 \pm 0,03$ $1,73 \pm 0,05$ $3,20 \pm 0,09$ $4,82 \pm 0,05$ $(3,7 \pm 0,2) 10^{-5}$ $< 5 \cdot 10^{-7}$ $(2,2 \pm 0,7) 10^{-4}$ $< 1,4 \cdot 10^{-5}$ $< 3 \cdot 10^{-6}$ $< 1,1 \cdot 10^{-6}$ $(1,9 \pm 1,2) 10^{-5}$ $(1 \pm 0,4) 10^{-4}$	$S = 1,6$	388,1 219,2 75,0 84,3 253,1 358,3 214,1 214,1 219,2 109,0 142,9 353,2 493,3 75,0	235,6 205,2 125,5 133,0 215,2 228,4 203,5 203,5 205,2 151,1 171,9 227,2 246,9 125,5
	$\frac{K^0 = K_S + K_L}{\sqrt{2}}$ $\bar{K}^0 = \frac{K_S - K_L}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{2} (0^-)$	$497,70 \pm 0,13$		50% K_S и 50% K_L	—	—	—	—	

Класс	Частица	Квантовые числа $I (J^{PG}) C$	Масса покоя, $M_{эв}$	Разность масс, $M_{эв}$	Среднее время жизни, $сек$	Каналы распада			
						Схема распада	Относительная вероятность, %	$Q, M_{эв}$	$\left \frac{M_{эв}}{P} \right \approx 0$
Мезоны	K_S	$\frac{1}{2} (0^-)$		$m_{K_L} - m_{K_S} =$ $= (-0,48 \pm$ $\pm 0,02) \tau_S^{-1}$	$(0,886 \pm 0,007) 10^{-10}$ $S = 2,4$	$\pi^+ \pi^-$ $\pi^0 \pi^0$	$68,77 \pm 0,26$ $31,23 \pm 0,26 \quad S = 1,3$	$218,5$ $227,8$	$206,0$ $209,0$
	K_L	$\frac{1}{2} (0^-)$		$S = 1,2$		$\pi^0 \pi^0 \pi^0$ $\pi^+ \pi^- \pi^0$ $\pi \mu \nu_\mu$ $\pi e \nu_e$ $\pi^+ \pi^-$	$21,3 \pm 0,6$ $11,5 \pm 0,4$ $27,5 \pm 0,5$ $39,0 \pm 0,6$ $0,177 \pm 0,018$	$92,8$ $83,6$ $252,5$ $357,6$ $218,5$	$139,3$ $132,8$ $216,0$ $229,3$ $206,0$
	η	$0 (0^{++}) C^+$	$548,8 \pm 0,6$ $S = 1,4$	—	$\Gamma = (2,63 \pm$ $\pm 0,5\delta) \text{ кэв}$	$\gamma\gamma$ $\pi^0 \gamma\gamma$ $3\pi^0$ $\pi^+ \pi^- \pi^0$ $\pi^+ \pi^- \gamma$ $\pi^0 e^+ e^-$ π_+	$38,0 \pm 1,0$ $3,1 \pm 1,1$ $30,0 \pm 1,1$ $25,3 \pm 1,4$ $5,1 \pm 0,7$ $< 0,04$ } $S = 1,2$	$548,6$ $413,6$ $143,7$ $134,5$ $269,4$ $412,6$	$274,3$ $257,7$ $179,4$ $174,4$ $236,1$ $257,7$
Барионы	p	$\frac{1}{2} \left(\frac{1^+}{2} \right)$	$938,2796 \pm$ $\pm 0,0027$	$m_n - m_p =$ $= 1,29344 \pm$ $\pm 0,00007$	Стабилен	—	—	—	—
	n	$\frac{1}{2} \left(\frac{1^+}{2} \right)$	$939,5731 \pm$ $\pm 0,0027$		918 ± 14	$p e^- \bar{\nu}_e$	100	0,78	1,19

Класс	Частица	Квантовые числа $I (J^{PG}) C$	Масса покоя, $M_{\text{эв}}$	Разность масс, $M_{\text{эв}}$	Среднее время жизни, сек	Каналы распада			
						Схема распада	Относительная вероятность, %	$Q, M_{\text{эв}}$	$M_{\text{эв}} \left \begin{smallmatrix} C \\ P \end{smallmatrix} \right $
Барионы	Λ	$0 \left(\frac{1^+}{2} \right)$	$1115,60 \pm 0,05$	—	$(2,578 \pm 0,021) 10^{-10}$ $S = 1,6$	$p \pi^-$ $n \pi_0$ $p \mu^- \bar{\nu}_\mu$ $p e^- \bar{\nu}_e$ $p \pi^- \gamma$	$64,2 \pm 0,5$ $35,8 \pm 0,5$ } $S = 1,4$ $(1,57 \pm 0,35) 10^{-4}$ $(0,813 \pm 0,029) 10^{-3}$ $(0,85 \pm 0,14) 10^{-3}$	37,6 40,9 71,5 176,7 —	100,2 103,7 130,8 163,1 100
	Σ^+	$1 \left(\frac{1^+}{2} \right)$	$1189,37 \pm 0,06$	$m_{\Sigma^-} - m_{\Sigma^+} =$ $= 7,99 \pm 0,08$ $S = 1,2$	$(0,800 \pm 0,006) 10^{-10}$	$p \pi^0$ $n \pi^+$ $n \pi^+ \gamma$ $\Lambda e^+ \nu_e$ $p \gamma$ $n \mu^+ \bar{\nu}_\mu$ $n e^+ \nu_e$	$51,6 \pm 0,7$ $48,4 \pm 0,7$ $(0,93 \pm 0,10) 10^{-3}$ $(2,02 \pm 0,47) 10^{-5}$ $(1,85 \pm 0,4) 10^{-3}$ $< 2,4 \cdot 10^{-5}$ $< 1,0 \cdot 10^{-5}$	116,2 110,3 110,3 73,4 251,1 144,2 249,3	189,0 185,0 185,0 71,6 224,6 202,4 223,6
	Σ^0	$1 \left(\frac{1^+}{2} \right)$	$1192,48 \pm 0,08$	$m_{\Sigma^-} - m_{\Sigma^0} =$ $= 4,87 \pm 0,07$	$< 1,0 \cdot 10^{-13}$	$\Lambda \gamma$ $\Lambda e^+ e^-$	100 $5,45 \cdot 10^{-3}$	77,0 —	74,5 74
	Σ^-	$1 \left(\frac{1^+}{2} \right)$	$1197,35 \pm 0,06$		$(1,482 \pm 0,017) 10^{-10}$ $S = 1,5$	$n \pi^-$ $n \pi^- \gamma$ $n \mu^- \bar{\nu}_\mu$ $n e^- \bar{\nu}_e$ $\Lambda e^- \bar{\nu}_e$	≈ 100 $\approx 0,1 \cdot 10^{-4}$ $(0,45 \pm 0,04) 10^{-3}$ $(1,08 \pm 0,04) 10^{-3}$ $(0,60 \pm 0,06) 10^{-4}$	118,1 118,1 152,0 257,1 81,2	192,8 192,8 209,4 229,9 79,0

Класс	Частица	Квантовые числа $I(J^{PC})C$	Масса покоя, $M_{\text{эв}}$	Разность масс, $M_{\text{эв}}$	Среднее время жизни, сек	Каналы распада			
						Схема распада	Относительная вероятность, %	$Q, M_{\text{эв}}$	$\frac{M_{\text{эв}}}{P^*}$
Барионы	Ξ^0	$\frac{1}{2} \left(\frac{1^+}{2} \right)$	$1314,9 \pm 0,6$	$m_{\Xi^-} - m_{\Xi^0} = 6,4 \pm 0,6$	$(2,96 \pm 0,12) 10^{-11}$	$\Lambda \pi^0$ $p \pi^-$ $p e^- \bar{\nu}_e$ $\Sigma^+ e^- \bar{\nu}_e$ $\Sigma^- e^+ \bar{\nu}_e$ $\Sigma^+ \mu^- \bar{\nu}_\mu$ $\Sigma^- \mu^+ \bar{\nu}_\mu$ $p \mu^- \bar{\nu}_\mu$	≈ 100 $< 0,9 \cdot 10^{-3}$ $< 1,3 \cdot 10^{-3}$ $< 1,5 \cdot 10^{-3}$ $< 1,5 \cdot 10^{-3}$ $< 1,5 \cdot 10^{-3}$ $< 1,5 \cdot 10^{-3}$ $< 1,3 \cdot 10^{-3}$	63,9 236,5 375,5 124,4 116,6 — — —	134,8 298,7 322,2 119,0 111,9 64 49 309
	Ξ^-	$\frac{1}{2} \left(\frac{1^+}{2} \right)$	$1321,29 \pm 0,14$			$\Lambda \pi^-$ $\Lambda e^- \bar{\nu}_e$ $n \pi^-$ $\Lambda \mu^- \bar{\nu}_\mu$ $\Sigma^0 e^- \bar{\nu}_e$ $\Sigma^0 \mu^- \bar{\nu}_\mu$ $ne^- \bar{\nu}_e$	≈ 100 $(2 \pm 1) 10^{-3}$ $< 0,5 \cdot 10^{-3}$ $< 1,2 \cdot 10^{-3}$ $< 0,3 \cdot 10^{-3}$ $< 0,5$ $< 1,0$	65,8 204,9 241,7 99,7 128,0 22,8 —	138,7 189,4 303,0 162,3 122,2 69,5 327
	Ξ^-	$0 \left(\frac{3^+}{2} \right)$	$1672,2 \pm 0,4$			$\Xi^0 \pi^-$ $\Xi^- \pi^0$ ΛK^-	≈ 50 ≈ 50	221 66	296 216

36.6. МЕЗОНЫ И МЕЗОННЫЕ РЕЗОНАНСЫ

Зарядовая четность нестранных зарядовых триплетов мезонов обозначена символом C_n , относящимся к нейтральному члену триплета.

Надежно установленные квантовые числа подчеркнуты чертой. Отсутствие черты означает, что соответ-

ствующее значение наиболее вероятно. Сокращение «нейтр.» относится к нейтралам π^0 и γ . Приводимые иногда за символом частицы цифры в скобках, например $\bar{K}^*$ (890), означают массу частицы в мегаэлектронвольтах и служат для идентификации частицы. Остальные пояснения см. в разд. 36.5.

Таблица 36.5

Характеристики мезонов и мезонных резонансов [9,10]

Тип мезона	Частица	Символ	Квантовые числа $I (J^{PG}) C A$	Масса покоя $m, M_{\text{эв}}$	Полиная ширина резонанса $\Gamma, M_{\text{эв}}$	$m^2, \Gamma_{\text{эв}}^2$ [$\Gamma (m^2), \Gamma_{\text{эв}}^2$]	Важнейшие каналы распада			
							Схема распада	Относи- тельная вероят- ность, %	$Q, M_{\text{эв}}$	$P, \frac{M_{\text{эв}}}{c}$
η	η	η_8	$0 (0^{-+}) C^+ A^-$	$548,8 \pm 0,6$	$(2,63 \pm 0,58) 10^{-3}$	0,301	См. табл. 36.4			
	ω	η_1^1	$0 (1^{-+}) C^- A^-$	$782,7 \pm 0,6$	$10,0 \pm 0,4$	$0,613$ [0,008]	$\pi^+ \pi^- \pi^0$ $\pi^+ \pi^-$ $\pi^0 \gamma$ $\eta + \text{нейтр.}$ $\pi^+ \pi^- \gamma$ $e^+ e^-$ $\mu^+ \mu^-$	90 1* $9 \pm 0,4$ $< 1,7$ < 5 $\approx 0,015$ $< 0,1$	369 504 648 234 504 782 572	327 366 380 199 366 391 377
	η^1	η_8^1	$0 (0^{-+}) C^+ A^-$	$957,6 \pm 0,3$	< 1	$0,917$ [$< 0,001$]	$\eta 2\pi$ $\rho \gamma$	77 ± 4 23 ± 4	131 203	232 182
	$K \bar{K}$ (См. 2*)	η_8	$0 (0^{++}) C^+ A^+$	993 ± 5	40 ± 8	$0,986$ [0,004]	$\pi \pi$ $K \bar{K}$	< 70 > 30	798 73	516 194
	Φ	η_1	$0 (1^{-+}) C^- A^+$ $S = 1,9$	$1019,7 \pm 0,3$	$4,2 \pm 0,2$	$1,040$ [0,004]	$K_L K_S$ $K^+ K^-$ $\pi \rho + 3\pi$ $\pi^0 \gamma$ $\eta + \text{нейтр.}$ $\mu^+ \mu^-$ $e^+ e^-$	$34,6 \pm 2,2$ $46,6 \pm 2,5$ 15 ± 5 — < 12 $0,025 \pm 0,003$ $0,032 \pm 0,002$	23 32 117 885 471 808 1018	109 126 188 501 362 499 510
	f	η_{α}^{11}	$0 (2^{++}) C^+ A^+$	1270 ± 10	170 ± 30	$1,61$ [0,22]	$\pi \pi$ 4π $K \bar{K}$	83 ± 5 4 ± 1 4 ± 3	974 695 265	619 556 394
	D	η_8	$0 (1^{+-}) C^- A^-$	1286 ± 10	30 ± 20	$1,65$ [0,03]	$K \bar{K} \pi$ $K^* K$	— —	154 —100	303 < 0
	E	η_8	$0 (1^{+-}) C^- A^-$	1416 ± 10	60 ± 20	$2,01$ [0,08]	$K^* \bar{K}$ $K \bar{K} \pi$ $\eta \pi \pi$	20 40 40	35 293 —	151 430 564
	f'	$\eta_{\alpha}^{11'}$	$0 (2^{++}) C^+ A^+$	1516 ± 3	40 ± 10	$2,29$ [0,06]	$K \bar{K}$ $K \bar{K}^* (890)$ $\pi \pi$	~ 60 ~ 40 *	505 111 1221	561 274 739
π	$\pi^{\pm}$ π^0	π_8	$1 (0^{--}) C_n^+ A^-$	$139,57$ $134,96$	$(7,8 \pm 0,9) \text{ эв}$	$0,019483$ [0,018217]	См. табл. 36.4			
	$\rho^{\pm}$	π_1	$1 (1^{--}) C_n^- A^+$	750 ± 10 $S = 2,8$	170 ± 10 $S = 2,1$	$0,593$ $0,116$	2π 4π	≈ 100 < 5	486 207	357 243
	ρ^0	π_1	$1 (1^{--}) C_n^- A^+$	$756,4 \pm 3,2$ $S = 1,6$	$115,5 \pm 8,2$ $S = 2,1$	$0,58$ [0,20]	$\pi \gamma$ $e^+ e^-$ $\mu^+ \mu^-$	2 $= 0,05$ $\approx 0,003$	626 764 558	370 382 370
	$K \bar{K}$ (См. 2*)	π_{α}	$1 (0^{+-}) C_n^+ A^+$	976 ± 10	50 ± 20	$0,953$ [0,049]	$K^{\pm} K^0$ $\eta \pi$	Большая —	11 315	75 315

Тип мезона	Частица	Символ	Квантовые числа $I(J^{PG}) SA$	Масса покоя $m, Mэв$	Полная ширина резонанса $\Gamma, Mэв$	$m^2, \Gamma эв^2$ [$\Gamma(m^2), \Gamma эв^2$]	Важнейшие каналы распада			
							Схема распада	Относи- тельная вероят- ность, %	$Q, Mэв$	$\rho, \frac{Mэв}{с}$
См. табл. 36.4										
π	A_1	π_0	$1(1^{+-}) \underline{C_n^+} A^-$	1080 ± 9	≈ 300	$1,17$ [0,33]	$\rho\pi$ $K\bar{K}$ (См. 4*) $\eta\pi$	≈ 100 < 1 $< 1,5$	167 — 384	231 — 380
	B	π	$1(1^{+ -}) \underline{C_n^-} A^+$	1237 ± 10	120 ± 20 $S = 2,2$	$1,53$ [0,12]	$\omega\pi$ $\pi\pi$ (См. 5*) $K\bar{K}$ (См. 5*) 4π	≈ 100 < 30 < 10 < 50	298 — — 662	339 — — 528
			A_2				π_{σ}^{11}	$1(2^{+-}) \underline{C_n^+} A^-$	1310 ± 10 $S = 2,5$	100 ± 10 $S = 1,1$
K	$K^\pm$ K^0	K_β	$\frac{1}{2} (0^-) A^-$	$493,707 \pm 0,037$ $497,0 \pm 0,13$		$0,244$ $0,248$	См. табл. 36.4			
	$K^*(892)$	K_γ	$\frac{1}{2} (1^-) A^+$	$892,2 \pm 0,5$	$49,8 \pm 1,1$	$0,796$ [0,044]	$K\pi$ $K\pi\pi$ $K\gamma$	≈ 100 $< 0,2$ $< 0,16$	258 118 27	288 216 310
	K_C	K	$\frac{1}{2} (1^+) A^-$	1242 ± 10	127 ± 25	$1,54$ [0,16]	$K\rho$ $K^*\pi$	≈ 75 ≈ 25	—44 184	< 0 253
	$K_A(1280-1400)$	K_δ	$\frac{1}{2} (1^+) A^-$	1313 ± 8	54 ± 20 $S = 1,6$	$1,72$ [0,14]	$K^*\pi$ } пере- $K\rho$ } кры- $K\pi$ } ваются	Большая —	290 53 687	340 182 558
	$K^*(1420)$	K_σ	$\frac{1}{2} (2^+) A^+$	1421 ± 5	100 ± 10	$2,02$ [0,14]	$K\pi$ $K^*\pi$ $K\rho$ $K\omega$ $K\eta$	$55 \pm 2,7$ $29,5 \pm 2,5$ $9,2 \pm 2,4$ $4,4 \pm 1,7$ $2,0 \pm 2,0$	767 369 137 124 358	604 414 319 306 482
	$L(1770)$	K	$\frac{1}{2} (2^-) A^-$	1765 ± 10	140 ± 50	$3,11$ [0,25]	$K\pi\pi$ $K\omega$ $K\pi$	Большая Заметная < 5	1032 520 1167	788 757 825

* Имеющиеся оценки вероятности распада лежат в интервале от 0,5 до 11 и зависят от предположений о характере интерференции.

** Не исключено, что этот резонанс просто связан с большим значением длины $K\bar{K}$ -рассеяния.

*** Согласно $SU(3)$ -симметрии, вероятность мала.

**** Распад запрещен по C -четности для нечетных значений J .

***** Разрешены, если только $J < 3$.

36.7. БАРИОНЫ И БАРИОННЫЕ РЕЗОНАНСЫ [8]

В колонке «Энергия пучка» приведены значения кинетической энергии E и импульса P первичных частиц

(π - или K -мезонов), приводящих к образованию соответствующего барионного резонанса. Остальные пояснения см. в разд. 36.5 и 36.6.

Характеристики барионов и барионных резонансов [9, 10]

Тип бариона	Частица	Энергия пучка, Мэв [P, Мэв/c]	$I(J^P)$	Масса покоя m , Мэв	Полная ширина резонанса Γ , Мэв	m^2, Γ_{90}^2 [$\Gamma^2 (m^2), \Gamma_{90}^2$]	Каналы распада			
							Схема распада	Относительная вероятность, %	Q, Мэв	$P, \frac{\text{Мэв}}{c}$
N	p n	—	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^+}{2}\right)$	См. табл. 36.4						
	N (1470)	426 [549]	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^+}{2}\right)$	~1400—1470	165—300	2,16 [0,37]	πN $\pi\pi N$	$\simeq 60$ $\simeq 35$	322 —	367 368
	N (1535)	663 [790]	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^-}{2}\right)$	~1500—1600	50—160	2,36 [0,15]	πN $N\eta$	$\simeq 30$ Заметная	472 62	478 210
	N (1520)	610 [737]	$\frac{1}{2}\left(\frac{3^-}{2}\right)$	~1510—1540	105—150	2,30 [0,19]	πN	$\simeq 50$	440	454
	N (1700)	921 [1051]	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^-}{2}\right)$	~1665—1765	100—300	2,89 [0,34]	πN $N\rho$	$\simeq 55$ $\simeq 10$	622 5	580 200
	N (1670)	900 [1030]	$\frac{1}{2}\left(\frac{5^-}{2}\right)$	~1670—1685	115—175	2,79 [0,23]	πN ΛK	$\simeq 35$ $\simeq 1$	610 75	572 231
	N (1688)	900 [1030]	$\frac{1}{2}\left(\frac{5^+}{2}\right)$	~1680—1690	105—180	2,86 [0,24]	πN	$\simeq 50$	610	572
	N (2190)	1937 [2072]	$\frac{1}{2}\left(\frac{7^-}{2}\right)$	$\simeq 2000$ —2260	150—325	4,80 [0,55]	πN ΛK	30	1112 577	888 711
	N (2650)	3123 [3260]	$\frac{1}{2}\left(\frac{11^-}{2}\right)$	2649 ± 10	$\simeq 360$	7,02 [0,95]	πN	$\simeq 7$	1572	1154
	N (1700)	[1050]	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^-}{2}\right)$	1665—1765	100—300	2,89 [0,34]	πN $\pi\pi N$ ΛK ΣK	$\simeq 55$ $\simeq 25$ $\simeq 5$ < 3	— — — —	580 547 250 109
	N (1780)	[1200]	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^+}{2}\right)$	1650—1860	50—350	3,17 [0,36]	πN $\pi\pi N$ ΛK	$\simeq 20$ > 40 < 7	— — —	633 603 448
	N (1810)	[1260]	$\frac{1}{2}\left(\frac{3^+}{2}\right)$	1770—1860	180—330	3,28 [0,45]	πN $\pi\pi N$ ΛK	$\simeq 25$ > 50 $\simeq 5$	— — —	652 624 386
	N (2220)	[2140]	$\frac{1}{2}\left(\frac{9^+}{2}\right)$	2200—2245	260—330	4,93 [0,67]	πN	~ 15	—	905
	N (3030)	[4410]	$\frac{1}{2}(?)$	~3030	~400	9,18 [1,21]	πN	—	—	1366

Тип барио- на	Частица	Энергия пуч ка $M_{\pi\pi}$ [P, Мэв/c]	J^P	Масса покоя m , Мэв	Полная ширина резонанса Γ , Мэв	m^2 , Гэв ² [$\Gamma(m^2)$, Гэв ²]	Каналы распада			
							Схема распада	Относительная вероятность, %	Q, Мэв	P, $\frac{M_{\pi\pi}}{c}$
Δ	$\Delta(1232)$	195 [304]	$\frac{3}{2} \left(\frac{3^+}{2} \right)$	$1236,0 \pm 0,55$ $m_0 - m_{++} = 0,45 \pm 0,85$ $m - m_{++} = 7,9 \pm 6,8$	$120,0 \pm 2,0$ $\Gamma_- - \Gamma_{++} = 25 \pm 23$	1,53 [0,30]	πN	99,4	158	227
	$\Delta(1650)$	867 [997]	$\frac{3}{2} \left(\frac{1^-}{2} \right)$	$\simeq 1670$	$\simeq 180$	2,72 [0,23]	πN $\pi\pi N$	$\simeq 30$ $\simeq 70$	592 —	560 510
	$\Delta(1950)$	1346 [1479]	$\frac{3}{2} \left(\frac{7^+}{2} \right)$	$\simeq 1920$	$\simeq 200$	3,69 [0,77]	πN ΣK	$\simeq 50$ $\simeq 2$	842 229	722 435
	$\Delta(2420)$	2502 [2638]	$\frac{3}{2} \left(\frac{11^+}{2} \right)$	2423 ± 10	$\simeq 275$	5,86 [1,33]	πN ΣK	$\simeq 10$ —	1342 729	1023 828
	$\Delta(2850)$	3709 [3847]	$\frac{3}{2} \left(\frac{15^+}{2} \right)$	2850 ± 12	$\simeq 300$	8,12 [1,71]	πN	$\simeq 3$	1772	1266
	$\Delta(1670)$	[1000]	$\frac{3}{2} \left(\frac{3^-}{2} \right)$	1650—1720	190—270	2,79 [0,43]	πN $\pi\pi N$	$\simeq 15$ > 60	— —	560 525
	$\Delta(1890)$	[1420]	$\frac{3}{2} \left(\frac{5^+}{2} \right)$	1840—1920	140—350	3,57 [0,47]	πN $\pi\pi N$ ΣK	$\simeq 17$ > 50 < 3	— — —	704 677 400
	$\Delta(1910)$	[1460]	$\frac{3}{2} \left(\frac{1^+}{2} \right)$	1780—1935	200—340	3,65 [0,57]	πN	$\simeq 25$	—	716
	$\Delta(3230)$	[5080]	$\frac{3}{2} (?)$	~ 3230	~ 440	10,43 [1,42]	πN	—	—	1475
Λ	Λ	—	$0 \left(\frac{1^+}{2} \right)$	См. табл. 36.4						
	$\Lambda(1405)$		$0 \left(\frac{1^-}{2} \right)$	1405 ± 5	40 ± 10	1,97 [0,06]	$\Sigma \pi$	100	68	142
	$\Lambda(1520)$	138 [395]	$0 \left(\frac{3^-}{2} \right)$	$1518,8 \pm 1,5$	16 ± 2	2,31 [0,02]	$\bar{K} N$ $\Sigma \pi$ $\Sigma \pi \pi$ $\Lambda \pi \pi$	45 ± 1 41 ± 1 $0,8 \pm 0,1$ $10 \pm 0,5$	83 183 — 125	234 258 140 250
	$\Lambda(1670)$	393 [737]	$0 \left(\frac{1^-}{2} \right)$	1660—1680	23—40	2,79 [0,06]	$\bar{K} N$ $\Lambda \eta$ $\Sigma \pi$	15—35 15—25 30—50	233 6 —	410 66 393
	$\Lambda(1815)$	662 [1062]	$0 \left(\frac{5^+}{2} \right)$	1820 ± 5	70—100	3,29 [0,15]	$\bar{K} N$ $\Sigma \pi$	≈ 61 ≈ 11	378 478	542 508

Тип барьона	Частица	Энергия пучка $M\varphi$ [P , $M\varphi/c$]	J^P	Масса покоя m , $M\varphi$	Полная ширина резонанса Γ , $M\varphi$	m^2 , $\Gamma^2\varphi^2$ [$\Gamma^2 (m^2)$, $\Gamma^2\varphi^2$]	Каналы распада			
							Схема распада	Относительная вероятность, %	Q , $M\varphi$	P , $\frac{M\varphi}{c}$
Λ	Λ (1830)	[1090]	$0\left(\frac{5^-}{2}\right)$	1810—1840	70—120	3,35 [0,17]	$\Lambda \eta$ $\Sigma (1385) \pi$	2 23—60 ~10	151 — —	367 519 554
	Λ_0^* (2100)	1280 [1703]	$0\left(\frac{7^-}{2}\right)$	2090—2120	80—140	4,41 [0,25]	$\bar{K} N$ $\Sigma \pi$ $\Lambda \eta$ ΞK $\Lambda \omega$	≈ 30 ~5 ~3 ~3 ~3	673 773 — — —	748 699 617 483 443
	Λ (1690)	[780]	$0\left(\frac{3^-}{2}\right)$	1690 ± 10	30—70	2,86 [0,10]	$N\bar{K}$ $\Sigma \pi$ $\Lambda \pi \pi$ $\Sigma \pi \pi$	20—30 30—50 ~25 ~25	— — — —	429 409 415 352
	Λ (2350)	[2290]	$0(?)$	≈ 2350	140—320	5,52 [0,56]	$N\bar{K}$	—	—	913
	(2585)	[2910]	$0(?)$	≈ 2585	~300	6,68 [0,78]	$N\bar{K}$	—	—	1058
Σ	Σ	—	$1\left(\frac{1^+}{2}\right)$	См. табл. 36.4						
	Σ (1385)		$1\left(\frac{3^+}{2}\right)$	(+) $1383,0 \pm 1,0$, $S = 1,3$ (-) $1387,0 \pm 1,2$ $S = 1,6$	35 ± 2 , $S = 2,2$ 42 ± 5 , $S = 3,4$	1,52 [0,05]	$\Lambda \pi$ $\Sigma \pi$	88 ± 2 12 ± 2 $S = 1,4$	130 48	208 117
	Σ (1670)	375 [716]	$1\left(\frac{3^-}{2}\right)$	$\approx 1670 \pm 10$	35—60	2,76 [0,08]	$\bar{K} N$ $\Lambda \pi$ $\Sigma \pi$ $\Lambda \pi \pi$ $\Lambda (1405) \pi$	~8 ~12 ~30—60 ~20 ~30	223 405 323 265 184	410 447 387 389 316
	Σ (1765)	558 [928]	$1\left(\frac{5^-}{2}\right)$	1767 ± 5 , $S = 1,1$	≈ 120	3,12 [0,21]	$\bar{K} N$ $\Lambda \pi$ $\Sigma \pi$ $\Sigma (1385) \pi$ $\Lambda (1520) \pi$	≈ 41 ≈ 13 $\approx 1,0$ ≈ 10 15	323 510 423 235 100	496 518 461 315 187
	Σ (1915)	861 [1262]	$1\left(\frac{5^+}{2}\right)$	≈ 1915	65	3,67 [0,25]	$\bar{K} N$ $\Lambda \pi$ $\Sigma \pi$	≈ 14 ≈ 6 ≈ 6	478 660 —	612 619 568

Тип бариона	Частица	Энергия пучка $M\text{эв}$ [P , $M\text{эв}/c$]	J^P	Масса покоя m , $M\text{эв}$	Полная ширина резонанса Γ , $M\text{эв}$	m^2 , Γ^2 [Γ (m^2), Γ^2]	Каналы распада			
							Схема распада	Относительная вероятность, %	Q , $M\text{эв}$	P , $\frac{M\text{эв}}{c}$
Σ	$\Sigma(2030)$	1114 [1530]	$1\left(\frac{7^+}{2}\right)$	2020—2040	120—170	4,12 [0,28]	$\bar{K}N$ $\Delta\pi$ $\Sigma\pi$ ΣK	≈ 20 ≈ 20 ~ 4 < 2	— 598 — —	700 703 652 412
	$\Sigma(1750)$	[910]	$1\left(\frac{1^-}{2}\right)$	1700—1790	50—100	3,06 [0,13]	$\bar{K}N$ $\Delta\pi$ $\Sigma\pi$ $\Sigma\eta$	12—45 5—18 6—19 11—44	— 785 — —	483 507 450 54
	$\Sigma(1940)$	[1320]	$1\left(\frac{3^-}{2}\right)$	1865—1950	110—280	3,76 [0,43]	$\bar{K}N$ $\Delta\pi$ $\Sigma\pi$	~ 21 ~ 4 < 7	— — —	678 680 589
	$\Sigma(2250)$	[2040]	$1(?)$	2245—2280	100—230	5,06 [0,36]	$\bar{K}N$	—	—	289
	$\Sigma(2455)$	[2570]	$1(?)$	≈ 2455	≈ 120	6,03 [0,29]	$\bar{K}N$	—	—	979
	$\Sigma(2620)$	[2950]	$1(?)$	≈ 2620	≈ 175	6,86 [0,46]	$\bar{K}N$	—	—	1064
Ξ	Ξ	—	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^+}{2}\right)$	См. табл. 36.4						
	$\Xi(1530)$	—	$\frac{1}{2}\left(\frac{3^+}{2}\right)$	(0) 1531,8 $\pm$ 0,3 (—) 1535,1 $\pm$ 0,7	(0) 9,1 $\pm$ 0,5 (—) 10,6 $\pm$ 2,6	2,34 [0,02]	$\Xi\pi$	100	70	144
	$\Xi(1820)$	—	$\frac{1}{2}\left(\frac{3^-}{2}\right)$	1795—1870	12—106	3,31 [0,11]	$\Delta\bar{K}$ $\Xi\pi$ $\Xi(1530)\pi$ $\Xi\pi\pi$ $\Sigma\bar{K}$	~ 65 ~ 10 ~ 20 ~ 5 —	207 360 150 220 —	396 413 234 356 413
	$\Xi(1940)$	—	$\frac{1}{2}\left(\frac{5^+}{2}\right)$	1920—1960	40 $\pm$ 140	3,76 [0,17]	$\Xi\pi$ $\Xi(1530)\pi$ ΔK	— — —	473 — 320	501 336 505
Ω	Ω^-	—	$0\left(\frac{3^+}{2}\right)$	См. табл. 36.4						

Обозначения:

μ_0 — магнетон Бора для электрона
($\mu_0 = 0,57883785 \cdot 10^{-14}$ Мэв/гс [9]);

μ_μ — магнетон Бора для мюона
($\mu_\mu = 0,2799541 \cdot 10^{-16}$ Мэв/гс [9]);

μ_π — ядерный магнетон Бора
($\mu_\pi = 3,1524515 \cdot 10^{-18}$ Мэв/гс [9]).

Частица	Магнитный момент
$e^\pm$	$(1,0011596567 \pm 0,0000000035) \mu_0$
$\mu^\pm$	$(1,00116616 \pm 0,000000031) \mu_\mu$
p	$(2,7928456 \pm 0,0000011) \mu_\pi$
n	$(-1,913148 \pm 0,000066) \mu_\pi$
Λ	$(-0,67 \pm 0,06) \mu_\pi$
Σ^+	$(2,62 \pm 0,41) \mu_\pi$

36.9. ПАРАМЕТРЫ РАСПАДОВ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ [9,10]

Обозначения: S и P — амплитуды s - и p -волн;

$$\alpha = \frac{2\operatorname{Re}(S^*P)}{|S|^2 + |P|^2}; \quad \beta = \frac{2\operatorname{Im}(S^*P)}{|S|^2 + |P|^2};$$

$$\gamma = \frac{|S|^2 - |P|^2}{|S|^2 + |P|^2}; \quad \Delta = \arctg \frac{\beta}{\alpha}.$$

Схемы и параметры распадов некоторых элементарных частиц

Схема распада	α	β	γ	Δ , град
$\Lambda \rightarrow p\pi^-$	$0,647 \pm 0,013$	—	0,76	$7,6^{+4,0}_{-4,1}$
$\Lambda \rightarrow n\pi^0$	$0,651 \pm 0,045$	—	—	—
$\Sigma^+ \rightarrow p\pi^0$	$-0,979 \pm 0,016$	—	0,17	187 ± 6
$\Sigma^+ \rightarrow p\pi^+$	$0,066 \pm 0,016$	—	-0,97	-73^{+136}_{-10}
$\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$	$-1,03^{+0,52}_{-0,42}$	—	—	—
$\Sigma^- \rightarrow n\pi^-$	$-0,069 \pm 0,008$	—	0,98	249^{+12}_{-115}
$\Xi^0 \rightarrow \Lambda\pi^0$	$-0,44 \pm 0,08$	—	0,84	184 ± 15
$\Xi^- \rightarrow \Lambda\pi^-$	$-0,393 \pm 0,023$	$+0,10$	0,92	184 ± 15

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Челен Г. Физика элементарных частиц. Пер. с англ. М., «Наука». 1966.
2. Марков М. А. Гипероны и K -мезоны. М., Физматгиз, 1958.
3. Lee T. D., Yang C. N. «Nuovo cimento», 1956, v. 3, p. 749.
Michel L. «Nuovo cimento», 1953, v. 10, p. 319.
4. Bronzan I. B., Low F. E. «Phys. Rev. Lett.», 1964, v. 12, p. 522.
5. Swart J. J. «Revs Mod. Phys.», 1963, v. 35, p. 916. (См. пер.: «Успехи физ. наук», 1964, т. 84, с. 651.)
Сморodinский Я. А. Унитарная симметрия элементарных частиц. «Успехи физ. наук», 1964, т. 84, с. 3.
6. Chewet G. F. e. a. «Sci. Amer.», 1964, v. 21, p. 74. (См. пер.: «Успехи физ. наук», 1964, т. 84, с. 525.)
7. Ширков Д. В. «Успехи физ. наук», 1970, т. 102, с. 87.
8. Rosenfeld A. N. e. a. «Revs Mod. Phys.», 1967, v. 39, p. 1.
9. Rosenfeld A. N. e. a. «Phys. Lett.», 1974, v. 50B, No 1.
10. Rosenfeld A. N. e. a. «Revs Mod. Phys.», 1975, v. 47, p. 535.

ГЛАВА 37

ЯДЕРНЫЕ СВОЙСТВА НУКЛИДОВ

37.1 ТАБЛИЦА ИЗОТОПОВ

В соответствии с установившейся к настоящему времени терминологией принято атомы с данным числом протонов и нейтронов в ядре называть *нуклидами*. Нуклиды с одинаковым числом протонов (т. е. принадлежащие одному химическому элементу) называются *изотопами*.

В табл. 37.1 приведены все достоверно известные радиоактивные и стабильные изотопы в порядке возрастания массового числа для каждого элемента. Данные расположены в шести колонках.

Колонка 1 — указан общепринятый символ элемента и его зарядовое число Z .

Колонка 2 — указано массовое число изотопа; символ m , следующий за массовым числом, означает, что в таблице приведено метастабильное состояние изотопа. Метастабильные состояния приведены лишь тогда, когда их периоды полураспада достаточно велики (≥ 1 сек), чтобы идентифицировать их независи-

мо от основных состояний. Символы m_1 и m_2 означают различные метастабильные состояния изотопа.

Колонка 3 — указан полный период полураспада нуклида. Для ряда тяжелых ядер указан также отдельно измеренный парциальный период полураспада для спонтанного деления. Он приведен под основным значением времени жизни ядра и обозначен символом (с. д.).

Колонка 4 — указан основной тип распада изотопа. Использованы следующие символы:

- β^- — электронный распад;
- β^+ — позитронный распад;
- э. з. — захват орбитального электрона;
- α — альфа-распад;
- и. п. — изомерный переход (распад из возбужденного метастабильного состояния на более низкий уровень);

- с. д. — спонтанное деление;
- n — испускание нейтронов из возбужденных сос-

тояний, возникающих в результате β -распада;

p — испускание протонов из возбужденных состояний, возникающих в результате β -распада.

Если у ядра существует несколько типов распада, то все они указаны в колонке 4. В ряде случаев за символом типа распада в круглых скобках приведено относительное разветвление (в процентах) способов распада. Например, э. з. (60). Отсутствие скобок означает, что относительное разветвление типов распада не определено.

Для стабильных изотопов в колонке 4 приведены в процентах значения относительной распространенности нуклида в земной коре. Для радиоактивных изотопов с очень большими периодами полураспада (и поэтому сохранившихся в земной коре) указаны как процентное содержание, так и тип распада. Например, ^{87}Rb — 27,85 β^- .

Колонка 5 — указаны значения энергий в мегаэлектронвольтах групп наиболее интенсивных частиц (α , β^- , β^+ , n , p), испускаемых при распаде нуклида. Цифры, характеризующие значение энергии, помещены на одной строке с обозначением типа распада. В круглых скобках приведена относительная интенсивность групп

частиц (в %) на полное число распадов. В косых скобках (например, /22/) приведена интенсивность групп частиц (в %), отнесенная только к конкретному типу распада. Для сплошных β^+ и β^- -спектров в таблице представлены, как правило, значения граничной энергии β -группы с наибольшей энергией. Если β -группа с наибольшей энергией имеет относительно слабую интенсивность, то приводятся значения граничной энергии и интенсивности одной или нескольких β -групп с меньшими граничными энергиями.

Колонка 6 — указаны значения энергии в мегаэлектронвольтах основного γ -излучения, сопровождающего распад нуклида. В круглых скобках приведена интенсивность γ -излучения (в %), отнесенная к полному числу распадов. В косых скобках приведена (в %) относительная интенсивность γ -излучения. Если после значения энергии скобки отсутствуют, это показывает, что значения интенсивностей точно не определены. В ряде случаев указан диапазон значений энергии γ -излучения. Символ 0,511 (ан.) означает, что γ -излучение имеет аннигиляционное происхождение.

Символами *, ** и *** помечены дублет, сложная линия и случай, когда все линии сложные.

Таблица 37.1

Таблица изотопов [1]

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ -излучения
^0n	1	11,7 мин	β^-	0,78	—
^1H	1	—	99,9852	—	—
	2	—	0,0148	—	—
	3	12,262 года	β^-	0,0186	—
^2He	3	—	$1,3 \cdot 10^{-4}$	—	—
	4	—	~ 100	—	—
	6	0,797 сек	β^-	3,508	—
	8	0,122 сек	β^-	—	0,98 (88)
^3Li	6	—	7,42	—	—
	7	—	92,58	—	—
	8	0,84 сек	β^-	13	—
	—	—	2 α	1,6	—
	9	0,176 сек	β^-	13,61	—
			n	0,76	—
^4Be	7	53,6 дня	э.з.	—	0,477 (10,3)
	9	—	100	—	—
	10	$2,5 \cdot 10^6$ лет	β^-	0,555	—
	11	13,6 сек	β^-	11,5	2,14 (32); 4,67 (2,1); 5,85 (2,4); 6,79 (4,4); 7,99 (1,7)
	12	0,0114 сек	n	—	—
^5B	8	0,77 сек	β^+	—	—
	—	—	2 α	1,6	—
	10	—	19,6	—	—
	11	—	80,4	—	—
	12	0,0203 сек	β^- (100)	13,37	4,43 (1,3)
	—	—	3 α (1,5)	0,195 (1,5)	—
	13	0,0186 сек	β^-	13,44	3,68 (7)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁶ C	9	0,127 сек	μ	8,2 (60); 1,1 (40)	—
	10	19,48 сек	β ⁺	1,87	0,511 (200, ан.); 0,717 (100); 1,023 (1,7)
	11	20,34 мин	β ⁺ (99) э.з. (0,19)	0,97	0,511 (200, ан.)
	12	—	98,892	—	—
	13	—	1,108	—	—
	14	5730 лет	β ⁻	0,156	—
	15	2,5 сек	β ⁻	9,82 (32); 4,51 (68)	5,299 (68)
	16	0,74 сек	n	—	—
⁷ N	12	0,01095 сек	β ⁺ (100)	16,4	0,511 (200, ан.); 4,43 (2,4)
	13	—	3α (3)	0,195 (3)	—
	14	9,96 мин	β ⁺	1,20	0,511 (200, ан.)
	15	—	99,635	—	—
	16	—	0,365	—	—
	17	7,14 сек	β ⁻	10,40 (26); 4,27 (74)	2,75 (1); 6,13 (69); 7,11 (5)
	18	—	α (0,0006)	1,7	—
	19	4,16 сек	β ⁻	8,68 (1,6); 7,81 (2,6); 4,1 (95)	0,87 (3); 2,19 (0,5)
⁸ O	13	—	n	0,40 (45); 1,21 (45); 1,81 (5)	—
	14	0,63 сек	β ⁻	9,4	0,82(59); 1,65(59); 1,98(100); 2,47 (41)
	15	—	β ⁺	—	—
	16	—	β ⁺	—	—
	17	—	99,759	—	—
	18	—	0,037	—	—
	19	—	0,204	—	—
	20	29,1 сек	β ⁻	4,60	0,197 (97); 1,37 (59)
⁹ F	13	0,0087 сек	p	6,40/100/; 6,97/24/	—
	14	70,91 сек	β ⁺	4,12 (0,6); 1,811 (99)	0,511 (200, ан.); 2,312 (99)
	15	123 сек	β ⁺	1,74	0,511(200, ан.)
	16	—	99,759	—	—
	17	—	0,037	—	—
	18	—	0,204	—	—
	19	29,1 сек	β ⁻	4,60	0,197 (97); 1,37 (59)
	20	14 сек	β ⁻	—	1,06 (100)
⁹ F	17	66,6 сек	β ⁺	1,74	0,511 (200, ан.)
	18	109,7 мин	β ⁺ (97)	0,635	0,511 (194, ан.)
	19	—	э.з. (3)	—	—
	20	—	100	—	—
	21	11,56 сек	β ⁻	5,41	1,63 (100)
	22	4,35 сек	β ⁻	5,4	0,350/100/; 1,38/13/
	23	4,0 сек	β ⁻	11	1,28 (100); 2,06 (67)
	24	—	β ⁻	—	—
¹⁰ Ne	17	0,10 сек	p	4,59	—
	18	1,5 сек	β ⁺	3,42	0,511 (200, ан.); 1,04 (7)
	19	17,4 сек	β ⁺	2,22	0,511 (200, ан.)
	20	—	90,92	—	—
	21	—	0,257	—	—
	22	—	8,82	—	—
	23	37,6 сек	β ⁻	4,38	0,439 (33); 1,64 (0,9)
	24	3,38 мин	β ⁻	1,99	0,472 (100); 0,88 (8)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
¹¹ Na	20	0,39 сек	β ⁺	11,4	—
		—	α	2,14/100/; 2,49/5/; 4,44/21/	—
	21	23,0 сек	β ⁺	2,52	0,350 (2,3); 0,511 (200, ан.)
	22	2,62 года	β ⁺ (90,6)	1,820 (0,05); 0,545	0,511 (180, ан.); 1,275 (100)
		—	э.з. (9,4)	—	—
	23	—	100	—	—
	24	14,96 ч	β ⁻	4,17 (0,003); 1,389 (100)	1,369 (100); 2,754 (100)
	24m	0,0203 сек	и.п.	—	0,472
¹² Mg		—	β ⁻	6	—
	25	60 сек	β ⁻	3,83	0,39 (14); 0,58 (14); 0,98 (15); 1,61 (6)
	26	1,04 сек	β ⁻	6,7	1,82 (100)
	20	0,6 сек	—	—	—
	21	0,121 сек	p	3,3; 3,8; 4,58; 6,14	—
	23	12,1 сек	β ⁺	3,03	0,44 (9); 0,511 (200, ан.)
	24	—	78,60	—	—
	25	—	10,11	—	—
¹³ Al	26	—	11,29	—	—
	27	9,46 мин	β ⁻	1,75	0,18 (0,7); 0,84 (70); 1,013 (30)
	28	21,2 ч	β ⁻	0,46	0,031 (96); 0,40 (30); 0,95 (30); 1,35 (70)
	24	2,10 сек	β ⁺ (100)	8,5	0,511 (200, ан.)
		—	α (~10 ⁻²)	2	—
	25	7,24 сек	β ⁺	3,24	0,511 (200, ан.)
	26	7,4 · 10 ⁵ лет	β ⁺ (85)	1,17	0,511 (170, ан.); 1,12 (4); 1,81 (100)
		—	э.з. (15)	—	—
¹⁴ Si	26m	6,37 сек	β ⁺	3,21	0,511 (200, ан.)
	27	—	100	—	—
	28	2,31 мин	β ⁻	2,85	1,780 (100)
	29	6,6 мин	β ⁻	2,40	1,28 (94); 2,43 (6)
	30	3,3 сек	β ⁻	5,0	2,23 (61); 3,51 (39)
	25	0,23 сек	p	3,34; 4,08; 4,68; 5,39	—
	26	2,1 сек	β ⁺	3,83	0,511 (200, ан.); 0,82 (34)
	27	4,14 сек	β ⁺	3,85	0,511 (200, ан.)
¹⁴ Si	28	—	92,18	—	—
	29	—	4,71	—	—
	30	—	3,12	—	—
	31	2,62 ч	β ⁻	1,48	1,26 (0,07)
	32	650 лет	β ⁻	0,21	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
¹⁵ P	28	0,28 сек	β ⁺	11,0	0,511 (200, ан.); 1,78 (75); 4,44 (10); 7,6 (5)
	29	4,45 сек	β ⁺	3,95	0,511 (200, ан.); 1,28 (0,8); 2,43 (0,2)
	30	2,50 мин	β ⁺	3,24	0,511 (200, ан.); 2,23 (0,5)
	31	—	100	—	—
	32	14,28 дня	β ⁻	1,710	—
	33	24,4 дня	β ⁻	0,248	—
	34	12,4 сек	β ⁻	5,1	2,13 (25); 4,0 (0,2)
¹⁶ S	29	0,19 сек	p	3,73; 5,40	—
	30	1,4 сек	β ⁺	5,09 (20); 4,42 (80)	0,511 (200, ан.); 0,687 (80)
	31	2,72 сек	β ⁺	4,42	0,511 (200, ан.); 1,27 (1,1)
	32	—	95,0	—	—
	33	—	0,760	—	—
	34	—	4,22	—	—
	35	87,9 дня	β ⁻	0,167	—
	36	—	0,014	—	—
	37	5,07 мин	β ⁻	4,7 (10); 1,6 (90)	3,09 (90)
	38	2,87 ч	β ⁻	3,0 (5); 1,1	1,88 (95)
¹⁷ Cl	32	0,306 сек	β ⁺	9,9	0,511 (200, ан.); 2,24 (70)
	33	2,53 сек	α (0,01)	—	4,29 (7); 4,77 (14)
	34	1,56 сек	β ⁺	4,55	0,511 (200, ан.); 2,9 (0,3)
	34m	31,99 мин	β ⁺ (~50)	4,46	0,511 (200, ан.)
	35	—	и.п. (~50)	2,48	0,145 (45); 0,511 (100, ан.); 1,17 (12); 2,12 (38); 3,30 (12)
	36	3,08·10 ⁵ лет	75,53	—	—
			β ⁻ (98,1)	0,714	0,511 (0,003, ан.)
			э.э. (1,9)	—	—
			β ⁺ (0,0012)	—	—
	37	—	24,47	—	—
	38	37,29 мин	β ⁻	4,91	1,60 (38); 2,170 (47)
	38m	0,74 сек	и.п.	—	0,66 (100)
	39	55,5 мин	β ⁻	3,45 (7); 2,18 (8); 1,91	0,246 (44); 1,27 (50); 1,52 (42)
	40	1,4 мин	β ⁻	7,5	1,46/100/; 2,83/100/; 3,10; 5,8
¹⁸ Ar	33	0,18 сек	p	3,16	—
	35	1,83 сек	β ⁺	4,94	0,511 (200, ан.); 1,22 (5); 1,76 (2)
	36	—	0,337	—	—
	37	35,1 дня	э.э.	—	—
	38	—	0,063	—	—
	39	269 лет	β ⁻	0,565	—
	40	—	99,600	—	—
	41	1,83 ч	β ⁻	2,49 (0,8); 1,198	1,293 (99)
	42	33 года	—	—	—
¹⁹ K	37	1,23 сек	β ⁺	5,14	0,511 (200, ан.); 2,79 (2)
	38	7,71 мин	β ⁺	2,68	0,511 (200, ан.); 2,170 (100)
	38m	0,95 сек	β ⁺	5,0	0,511 (200, ан.)
	39	—	93,22	—	—
	40	1,26·10 ⁹ лет	0,118	—	1,460 (11)
		—	β ⁻ (89)	1,314	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
¹⁹ K	40	—	э.з. (11)	—	—
	41	—	β ⁺ (0,001)	0,483	—
	42	—	6,77	—	—
	43	12,36 ч	β ⁻	3,52	0,31 (0,2); 1,524 (18)
	44	22,4 ч	β ⁻	1,82 (1); 1,2 (3); 0,83	0,373 (85); 0,39* (18); 0,59 (13); 0,619 (81)
	45	22,0 мин	β ⁻	5,2	1,156 (61); 1,74 (8); 2,1** (37); 2,6 (7)
	46	16,3 мин	β ⁻	4,0; 2,1	—
²⁰ Ca	47	17,5 сек	β ⁻	6,1 (1); 4,1	2,0 (84); 2,6 (15)
	37	0,173 сек	p	3,10	—
	38	0,66 сек	β ⁺	—	—
	39	0,87 сек	β ⁺	5,49	0,511 (200, ан.)
	40	—	96,97	—	—
	41	8·10 ⁴ лет	э.з.	—	—
	42	—	0,64	—	—
	43	—	0,145	—	—
	44	—	2,06	—	—
	45	165 дней	β ⁻	0,252	—
	46	—	0,0033	—	—
²¹ Sc	47	4,535 дня	β ⁻	1,98 (18); 0,67	0,49 (5); 0,815 (5); 1,308 (74)
	48	—	0,185	—	—
	49	8,8 мин	β ⁻	1,95	3,10 (89); 4,1 (10)
	50	9 сек	—	—	0,072
	40	0,179 сек	β ⁺	9,1	0,511 (200, ан.); 3,75
	41	0,60 сек	β ⁺	5,47	—
	42	0,683 сек	β ⁺	—	0,511 (200, ан.)
	42m	60,6 сек	β ⁺	2,82	0,438 (100); 0,511 (200, ан.); 1,22 (100); 1,52 (100)
	43	3,92 ч	β ⁺	1,20	0,375 (22); 0,511 (180, ан.)
	44	3,92 ч	β ⁺	1,47	0,511 (188, ан.); 1,159 (100)
²² Ti	44m	2,44 дня	э.з. (5)	—	—
	—	—	и.п. (98,6)	—	0,271 (86); 1,02 (1,3)
	45	—	э.з. (1,4)	—	—
	46	83,9 дня	100	—	—
	46m	19,5 сек	β ⁻	1,48 (0,004); 0,357	0,889 (100); 1,120 (100)
	47	3,43 дня	и.п.	—	0,142
	48	1,83 дня	β ⁻	0,600	0,160 (73)
	—	—	β ⁻	0,65	0,175 (6); 0,983 (100); 1,040 (100); 1,314 (100)
	49	57,5 мин	β ⁻	2,01	1,76 (0,03)
	50	1,72 мин	β ⁻	3,6	0,520 (100); 1,12 (100); 1,55 (100)
	50m	0,35 сек	и.п.	—	0,258
	41	0,090 сек	p	2,3/8/; 3,05/17/; 3,68/16/; 4,12/4/; 4,64/50/; 5,30/5/	—
	43	0,56 сек	β ⁺	5,8	—
	44	48 лет	э.з.	—	0,068 (90); 0,078 (98)
²³ V	45	3,09 ч	β ⁺	1,04	0,718 (0,4); 1,408 (0,3)
	46	—	7,99	—	—
	47	—	7,32	—	—
	48	—	73,99	—	—
	49	—	5,46	—	—
	50	—	5,25	—	—
	51	5,79 мин	β ⁻	2,14	0,320 (95); 0,605 (1,5); 0,928 (5)
	46	0,426 сек	β ⁺	6,03	0,511 (200, ан.)
	47	33 мин	β ⁺	1,89	1,80 (0,5)
	48	16,0 дней	β ⁺ (49)	0,696	0,511 (100, ан.); 0,945 (10); 0,983 (100); 1,312 (97)
²³ V	—	—	э.з. (51)	—	—
	49	330 дней	э.з.	—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов. %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
^{23}V	50	$6 \cdot 10^{15}$ лет	0,25 э.з. (70)	—	0,783 (30); 1,55 (70)
	—	—	β ⁻ (30)	—	—
	51	—	99,75	—	—
	52	3,75 мин	β ⁻	2,47	1,434 (100)
	53	2,0 мин	β ⁻	2,50	—
	54	55 сек	β ⁻	3,3	0,84 (100); 0,99 (100); 2,21 (100)
^{24}Cr	48	23 ч	э.з.	—	0,116 (98); 0,31 (99)
	49	41,9 мин	β ⁺	1,54	0,063 (14); 0,091 (28); 0,153 (13)
	50	—	4,31	—	—
	51	27,8 дня	э.з.	—	—
	52	—	83,76	—	—
	53	—	9,55	—	—
	54	—	2,38	—	—
	55	3,52 мин	β ⁻	2,59	—
	56	5,9 мин	β ⁻	1,5	0,026; 0,083
	—	—	—	—	—
^{25}Mn	50	0,286 сек	β ⁺	6,61	—
	51	45,2 мин	β ⁺	2,17	—
	52	5,60 дня	э.з. (66)	—	0,511 (67, ан.);
	—	—	β ⁺ (34)	0,575	0,744 (82); 0,935 (84); 1,434 (100)
	52m	21,1 мин	β ⁺	1,63	0,511 (193, ан.);
	—	—	и.п. (2)	—	1,434 (100)
	53	$1,9 \cdot 10^6$ лет	э.з.	—	—
	54	303 дня	э.з.	—	0,835 (100)
	55	—	100	—	—
	56	2,576 ч	β ⁻	2,85	0,847 (99); 1,811 (29); 2,110 (15)
	57	1,7 мин	β ⁻	2,55	—
	58	1,1 мин	β ⁻	—	—
^{26}Fe	52	8,2 ч	β ⁺ (56)	0,80	0,165 (100); 0,511 (112, ан.)
	—	—	э.з. (44)	—	—
	53	8,51 мин	β ⁺	3,0	0,38 (32); 0,511 (196, ан.)
	54	—	5,84	—	—
	55	2,60 года	э.з.	—	—
	56	—	91,68	—	—
	57	—	2,17	—	—
	58	—	0,31	—	—
	59	45,6 дня	β ⁻	1,57 (0,3); 0,475	0,192 (2,8); 1,095 (56); 1,292 (44)
	60	$3 \cdot 10^6$ лет	—	—	—
	61	6,0 мин	β ⁻	2,8	0,13/11/; 0,30/48/; 1,03/98/; 1,20/100/
^{27}Co	54	0,194 сек	β ⁺	—	—
	55	18,2 ч	β ⁺ (81)	1,50	0,480 (12); 0,511 (160, ан.); 0,930 (80); 1,41 (13)
	—	—	э.з. (19)	—	—
	56	77,3 дня	э.з. (80)	—	0,511 (40, ан.); 0,847 (100); 1,04 (15); 1,24 (66); 1,76 (15); 2,62 (11); 2,60 (17); 3,26 (13)
	—	—	β ⁺ (20)	1,49	0,122 (87); 0,136 (11)
	57	270 дней	э.з.	—	0,511 (30, ан.); 0,810 (99)
	58	71,3 дня	э.з. (85)	—	0,865 (1,4)
	—	—	β ⁺ (15)	0,474	—
	58m	9,2 ч	и.п.	—	—
	59	—	100	—	—
	60	5,263 года	β ⁻	1,48 (0,12); 0,314 (99)	1,173 (100); 1,332 (100)
	60m	10,47 мин	и.п. (> 99)	—	0,059 (2,1); 1,33 (0,25)
	—	—	β ⁻ (0,25)	1,55	—
	61	99,0 мин	β ⁻	1,22	0,067 (89)
	62	13,9 мин	β ⁻	2,88	1,17** (180); 1,47 (20); 1,74 (19); 2,03 (7)
	63	52 сек	β ⁻	3,6	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (от интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
²⁸ Ni	56	6,10 дня	э.з.	—	0,163 (99); 0,276 (31); 0,472 (35); 0,748 (48); 0,812 (85); 1,56 (14)
	57	36,0 ч	э.з. (54)	—	0,127 (14); 0,511 (92, ан.); 1,37 (86); 1,89 (14)
	58	—	β ⁺ (46)	0,85	—
	59	—	67,76	—	—
	60	8·10 ⁹ лет	э.з.	—	—
	61	—	26,16	—	—
	62	—	1,25	—	—
	63	—	3,66	—	—
	64	92 года	β ⁻	0,067	—
	65	—	1,16	—	—
	66	2,564 ч	β ⁻	2,13	1,115 (16); 1,481 (25)
²⁹ Cu	67	54,8 ч	β ⁻	0,20	—
	67	50 сек	β ⁻	4,1	0,90* (51); 1,26 (15)
	58	3,20 сек	β ⁺	8,2	—
	59	81,5 сек	β ⁺	3,7	—
	60	23,4 мин	β ⁺ (93)	3,92 (6); 3,00 (18); 2,00	0,511 (197, ан.); 0,872 (9); 1,305 (11)
	61	—	э.з. (7)	—	0,511 (186, ан.); 0,85 (15); 1,332 (80); 1,76 (52)
	61	3,32 ч	β ⁺ (60)	1,22	0,067 (4); 0,284 (12); 0,38 (3); 0,511 (120, ан.); 1,19 (5)
	62	—	э.з. (40)	—	0,511 (195, ан.); 0,88 (0,3)
	62	9,76 мин	β ⁺	2,91	—
	63	—	69,1	—	0,511 (38, ан.); 1,34 (0,5)
	64	12,80 ч	э.з. (43)	—	—
³⁰ Zn	65	—	β ⁻ (38)	0,573	—
	66	—	β ⁺ (19)	0,656	—
	66	—	30,9	—	—
	66	5,10 мин	β ⁻	2,63	1,039 (9)
	67	58,5 ч	β ⁻	0,57	0,092* (23); 0,184 (40)
	68	30 сек	β ⁻	3,5	0,80 (17); 1,078 (95)
	60	2,1 мин	—	—	—
	61	1,48 мин	β ⁺	4,4	0,48 (11); 0,511 (198, ан.); 0,98 (3); 1,64 (6)
	62	9,13 ч	э.з. (82)	—	0,042 (20); 0,51** (47); 0,59 (22)
	63	38,4 мин	β ⁺ (18)	0,66	—
	63	—	β ⁺ (93)	2,34	0,511 (186, ан.); 0,669 (8); 0,962 (6)
³¹ Ga	64	—	э.з. (11)	—	—
	64	—	48,89	—	—
	65	245 дней	э.з. (98,3)	—	0,511 (3,4, ан.); 1,115 (49)
	66	—	β ⁺ (1,7)	0,327	—
	66	—	27,81	—	—
	67	—	4,11	—	—
	68	—	18,56	—	—
	69	57 мин	β ⁻	0,90	—
	69m	13,8 ч	и.п.	—	0,439 (95)
	70	—	0,62	—	—
	71	2,4 мин	β ⁻	2,61	0,39 (1,3); 0,510 (13); 0,92 (3); 1,12 (1,3)
³¹ Ga	71m	3,92 ч	β ⁻	1,46	0,13 (9); 0,385 (94); 0,495 (75); 0,609 (65); 0,76 (5); 0,99 (8)
	72	46,5 ч	β ⁻	0,30	0,015 (8); 0,145 (90); 0,192 (10)
	63	33 сек	—	—	—
	64	2,6 мин	β ⁺	6,05 (33); 2,8	0,511 (196, ан.); 0,80 (15); 0,992 (43); 1,38 (14); 2,18 (11); 3,32 (18)
	65	15,2 мин	β ⁺ (> 50)	2,24 (12); 2,11	0,061 (12); 0,115 (55); 0,152 (10); 0,511 (180, ан.); 0,75 (10)
	66	9,45 ч	β ⁺ (< 50)	—	0,511 (114, ан.); 1,039 (37); 2,183 (5); 2,748 (25); 4,30 (5)
³¹ Ga	67	—	э.з. (43)	—	0,093 (40); 0,184 (24); 0,296 (22); 0,388 (7)
	67	77,9 ч	э.з.	—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
³¹ Ga	68	68,3 мин	β ⁺ (88)	1,90	0,511(176, ан.); 1,078(3,5)
	69	—	э.з. (12)	—	—
	70	21,1 мин	β ⁺	1,65	0,173(0,16); 1,040(0,5)
	71	—	39,8	—	—
	72	14,12 ч	β ⁺	3,15	0,630(27); 0,835(96); 2,201(26); 2,50*(20)
	73	4,9 ч	β ⁺	1,19	0,054(9); 0,295(94); 0,74(6)
	74	8,0 мин	β ⁺	2,5	0,60*(100); 0,87*(9); 2,35(45)
	75	2,0 мин	β ⁺	3,3	0,58(3)
³² Ge	76	32 сек	β ⁺	6	—
	65	1,5 мин	β ⁺	3,7	0,511(197, ан.); 0,67(3); 1,72(2)
	66	2,4 ч	β ⁺ (62)	1,3	0,046(37); 0,114(22); 0,185(23); 0,27(19); 0,34(19); 0,38(48); 0,47(19); 0,511(124, ан.)
	67	18,7 мин	э.з. (38)	—	0,170*(105); 0,511(170, ан.)
	68	275 дней	β ⁺	3,1	—
	69	36 ч	э.з. (67)	—	0,511(68, ан.); 0,573(13); 0,872(10); 1,107(28)
	70	—	β ⁺ (33)	1,22	—
	71	—	20,55	—	—
	72	11,4 дня	э.з.	—	—
	73	—	27,37	—	—
	73m	0,53 сек	7,67	—	—
	74	—	и.п.	—	0,054(9)
	75	82 мин	36,74	—	—
	75m	48 сек	β ⁺	1,19	0,199(1,4); 0,265(11)
	76	—	и.п.	—	0,139(34)
	77	11,3 ч	7,67	—	—
	77m	54 сек	β ⁺	2,2	0,21*(61); 0,263(45); 0,368(15); 0,417(25); 0,563(18); 0,73*(14)
	78	1,47 ч	β ⁺ (76)	2,9	0,159(12); 0,215(21)
	78	—	и.п. (24)	0,71	0,277(94)
³³ As	69	15 мин	β ⁺	2,9	0,23; 0,511(ан.)
	70	52 мин	β ⁺	2,89(6); 2,14	0,511(183, ан.); 0,60(23); 0,67(25); 0,75(23); 1,040(78); 1,12(23); 1,71(22)
	71	62 ч	э.з. (~ 70)	—	0,175(90); 0,511(60, ан.)
	72	26 ч	β ⁺ (~ 30)	0,81	—
	73	—	β ⁺	3,34(17); 2,50	0,511(150, ан.); 0,630(8); 0,835(78)
	74	80,3 дня	э.з.	—	—
	74	17,9 дня	э.з.	—	0,054(9)
	74m	8,0 сек	β ⁺ (29)	1,54(3); 0,95(26)	0,511(59, ан.); 0,596(61); 0,635(14)
	75	—	э.з. (39)	—	—
	76	—	β ⁺ (32)	1,36	—
	77	—	и.п.	—	0,283
	78	26,4 ч	100	—	—
	79	38,7 ч	β ⁺	2,97	0,559(43); 0,657(6); 1,22*(5)
	80	91 мин	β ⁺	0,68	0,239(2,5); 0,522(0,8)
	81	—	β ⁺	4,1	0,614/42/; 0,70/15/; 0,83/8/; 1,31/11/
	82	9,0 мин	β ⁺	2,15	0,36(2); 0,43(2); 0,89(1)
	83	15,3 сек	β ⁺	6,0	0,666(42); 1,22(4); 1,64(4); 1,77(1,7)
³⁴ Se	84	33 сек	β ⁺	3,8	—
	70	~ 44 мин	β ⁺	—	—
	71	4,5 мин	β ⁺	3,4	0,16; 0,511(ан.)
	72	8,4 дня	э.з.	—	0,046(59)
³⁵ Br	73	7,1 ч	β ⁺ (65)	1,30	0,066(65); 0,359(99); 0,511(130, ан.)
	74	—	э.з. (35)	—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
³⁴ Se	74	—	0,87	—	—
	75	120,4 дня	э.з.	—	0,121(17); 0,136(57); 0,265(60); 0,280(25); 0,401(12)
	76	—	9,02	—	—
	77	—	7,58	—	—
	77m	17,5 сек	и.п.	—	0,161(50)
	78	—	23,52	—	—
	79	~ 6,5 · 10 ⁴ лет	β ⁻	0,16	—
	79m	3,91 мин	и.п.	—	0,096(9)
	80	—	49,82	—	—
	81	18,6 мин	β ⁻	1,58	0,28**(0,9); 0,56**(0,3); 0,83(0,2)
	81m	56,8 мин	и.п.	—	0,103(8)
	82	—	9,19	—	—
	83	25 мин	β ⁻	1,8	0,22(44); 0,36(69); 1,88(16); 2,29(9)
	83m	70 сек	β ⁻	3,8	0,35/16/; 0,65/20/; 1,01**/100/; 2,02/40/
	84	3,3 мин	—	—	—
	85	39 сек	—	—	—
³⁶ Br	74	36 мин	β ⁺	4,7	0,511 (ан.); 0,64
	75	1,7 ч	β ⁺ (~90)	1,70	0,285; 0,511 (ан.); 0,62
	—	—	э.з. (~10)	—	—
	76	16,1 ч	β ⁺ (~62)	3,6	0,511(133, ан.); 0,559(63); 0,65(19); 1,21(13); 1,86(11)
	—	—	э.з. (~38)	—	—
	77	57 ч	э.з. (99)	—	0,24**(30); 0,52(24); 0,58(7)
	—	—	β ⁺ (1)	0,34	—
	77m	4,2 мин	и.п.	—	0,108
	78	6,5 мин	β ⁺	2,55	0,511(184, ан.); 0,614(14)
	79	—	50,52	—	—
	79m	4,8 сек	и.п.	—	0,21
	80	17,6 мин	β ⁻ (92)	2,00	0,511(5, ан.); 0,618(7); 0,666(1)
	—	—	β ⁺ (2,6)	0,87	—
	—	—	э.з. (5,7)	—	—
	80m	4,38 ч	и.п.	—	0,037(36)
	81	—	49,48	—	—
	82	35,34 ч	β ⁻	0,444	0,554(66); 0,619(41); 0,777(83); 1,044(29)
	82m	6,05 мин	и.п. (97,6)	—	0,046(0,3); 0,777(0,15)
	—	—	β ⁻ (2,4)	—	—
	83	2,41 ч	β ⁻	0,93	0,530(1,4)
	84	31,8 мин	β ⁻	4,68	0,88(51); 1,90(18); 3,93(13)
	85	3,0 мин	β ⁻	2,5	—
	86	54 сек	β ⁻	7,1	1,36/39/; 1,56/100/; 2,75/36/
	87	55,6 сек	β ⁻	2,6	1,44/100/; 1,85/18/; 2,48/18/; 2,98/25/; 4,19/21/
	88	15,5 сек	β ⁻	—	0,76
	89	4,5 сек	β ⁻	—	—
³⁶ Kr	74	20 мин	β ⁺	3,1	0,511 (ан.)
	76	14,8 ч	э.з.	—	—
	77	1,19 ч	э.з. (~20)	—	—
	—	—	β ⁺ (~80)	1,86	—
	78	—	0,354	—	—
	79	34,92 ч	э.з. (92)	—	0,398(10); 0,511(15, ан.); 0,606(10)
	—	—	β ⁺ (8)	0,60	—
	79m	55 сек	и.п.	—	0,127
	80	—	2,27	—	—
	81	2,1 · 10 ⁵ лет	э.з.	—	—
	81m	13 сек	и.п.	—	0,190(65)
	82	—	11,56	—	—
	83	—	11,55	—	—
	83m	1,86 ч	и.п.	—	0,009(9)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв и (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
³⁶ Kr	84	—	56,90	—	—
	85	10,76 ч	β ⁻	0,67	0,514(0,4)
	85m	4,4 ч	β ⁻ (77)	0,82	0,150(74); 0,305(13)
	—	—	и.п. (23)	—	—
	86	—	17,37	—	—
	87	76 мин	β ⁻	3,8	0,403(84); 0,85(16); 2,57(35)
	88	2,80 ч	β ⁻	2,8	0,191(35); 0,85(23); 1,55(14); 2,40(35)
	89	3,18 мин	β ⁻	4,0	0,23/85/; 0,51/42/; 0,60/100/; 0,88/65/; 1,12/45/; 1,51/88/; 0,120(65); 0,536(48); 1,11(48)
	90	33 сек	β ⁻	2,80	—
	91	9,8 сек	β ⁻	3,6	—
	92	3,0 сек	β ⁻	—	—
	93	2,0 сек	β ⁻	—	—
	94	1,4 сек	β ⁻	—	—
³⁷ Rb	79	24 мин	β ⁺	—	0,15(73); 0,19(29); 0,511(180, ан.)
	80	34 сек	β ⁺	4,1	0,511(195, ан.); 0,618(39)
	81	4,7 ч	э.з. (87)	—	—
	—	—	β ⁺ (13)	1,03	—
	81m	31 мин	β ⁺	1,4	—
	—	—	и.п.	—	—
	82	1,25 мин	β ⁺ (96)	3,15	0,511(192, ан.); 0,777(9)
	—	—	э.з. (4)	—	0,554(66); 0,619(41); 0,777(83)
	82m	6,3 ч	э.з. (94)	—	0,53**(93); 0,79(0,9)
	—	—	β ⁺ (6)	0,78	0,511(42, ан.); 0,88(74)
	83	83 дня	э.з.	—	—
	84	33,0 дня	э.з. (76)	—	—
	—	—	β ⁺ (21)	1,66	—
	—	—	β ⁻ (3)	0,91	—
	84m	20 мин	и.п.	—	0,216(37); 0,250(65); 0,464(32)
	85	—	72,15	—	—
	86	18,66 дня	β ⁻	1,78	1,078(8,8)
	86m	1,02 мин	и.п.	—	0,56
	87	4,8·10 ¹⁰ лет	27,85	—	—
	—	—	β ⁻	0,274	—
	88	17,8 мин	β ⁻	5,3	0,898(13); 1,863(21)
	89	15,4 мин	β ⁻	3,92(7); 2,9(5); 1,6	0,66(17); 1,05(75); 1,26(54)
	90	2,91 мин	β ⁻	6,6	0,83*(61); 3,34**(15); 4,13(11); 4,34*(18)
³⁸ Sr	80	1,7 ч	э.з.	—	0,58
	81	29 мин	э.з.	—	—
	—	—	β ⁺	—	—
	82	25,0 дней	э.з.	—	—
	83	32,4 ч	э.з. (84)	—	0,040(24); 0,38(35); 0,511(32, ан.); 0,76(40)
	—	—	β ⁺ (16)	1,15	—
	84	—	0,56	—	—
	85	64,0 дня	э.з.	—	0,514(100)
	85m	70 мин	и.п. (86)	—	0,150(14); 0,231(85)
	—	—	э.з. (14)	—	—
	86	—	9,86	—	—
	87	—	7,02	—	—
	87m	2,83 ч	и.п. (99)	—	0,388(80)
	—	—	э.з. (1)	—	—
³⁸ Sr	88	—	82,56	—	—
	89	52,7 дня	β ⁻	1,463	0,91(0,009)
	90	27,7 лет	β ⁻	0,546	—
	—	—	—	—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁸⁸ Sr	91	9,67 ч	β ⁻	2,67	0,645(15); 0,748(27); 1,025(30)
	92	2,71 ч	β ⁻	1,5(10); 0,55	0,44(3); 1,37(90)
	93	8,3 мин	β ⁻	2,9	0,60; 0,8; 1,2
	94	1,35 мин	β ⁻	2,1	1,42(100)
	95	0,8 мин	β ⁻	—	—
⁸⁹ Y	82	12,3 мин	—	—	—
	83	7,4 мин	—	—	—
	84	43 мин	β ⁺	3,5	0,795(100); 0,982(100); 1,041(50)
	85	5,0 ч	β ⁺ (70)	2,24	0,231(13);
	—	—	э.з. (30)	—	0,511(140, ан.)
	85m	2,68 ч	β ⁺ (55)	1,54	0,51**(200);
	—	—	э.з. (45)	—	0,92(9)
	86	14,6 ч	э.з. (74)	—	0,51*(35); 0,63*(37);
	—	—	β ⁺ (26)	3,15; 2,34	1,077(82); 1,16*(35); 1,925(24)
	86m	48 мин	и.п.	—	0,208(94)
	87	80 ч	э.з. (> 99)	—	0,483
	—	—	β ⁺ (~0,3)	—	—
	87m	14 ч	и.п.	—	0,381(74)
	—	—	β ⁺ (~5)	—	—
	88	108,1 дня	э.з. (> 99)	—	0,898(91); 1,836(100)
	—	—	β ⁺ (0,2)	0,76	—
	89	—	100	—	—
	89m	16,1 сек	и.п.	—	0,91(99)
	90	64,0 ч	β ⁻	2,27	—
	90m	3,1 ч	и.п.(99,6)	—	0,202(97); 0,482(91)
	—	—	β ⁻ (0,4)	—	—
	91	58,8 дня	β ⁻	1,545	1,21(0,3)
	91m	50,3 мин	и.п.	—	0,551(95)
	92	3,53 ч	β ⁻	3,63	0,934(14); 1,40(4,7)
	93	10,3 ч	β ⁻	2,89	0,267(6); 0,94(2,3); 1,90(1,8)
	94	20,3 мин	β ⁻	5,0	0,56(6); 0,92(43); 1,13(5)
	95	10,9 мин	β ⁻	—	—
	96	2,3 мин	β ⁻	3,5	0,7; 1,0; 1,5**
⁴⁰ Zr	84	16 мин	—	—	—
	85	1,4 ч	—	—	—
	86	16,5 ч	э.з.	—	0,028(20); 0,243(96); 0,612(5)
	87	1,6 ч	β ⁺	2,10	0,511 (ан.); 1,2; 2,2
	88	85 дней	э.з.	—	0,394(97)
	89	78,4 ч	э.з. (78)	—	0,511(44, ан.);
	—	—	β ⁺ (22)	0,90	0,91(99)
	89m	4,18 мин	и.п. (94)	—	0,588(87); 1,51(6)
	—	—	э.з. (4,7)	—	—
	—	—	β ⁺ (1,4)	2,40(0,2); 0,89(1,2)	—
	90	—	51,46	—	—
	90m	0,80 сек	и.п.	—	2,18(14); 2,32(86)
	91	—	11,23	—	—
	92	—	17,11	—	—
	93	1,5·10 ⁶ лет	β ⁻	0,060	—
	94	—	17,40	—	—
	95	65,5 дня	β ⁻	0,89(2); 0,396	0,724(49); 0,756(49)
	96	—	2,80	—	—
	97	17,0 ч	β ⁻	1,91	0,747(92)
	98	1 мин	—	—	—
⁴¹ Nb	88	14 мин	β ⁺	3,2	—
	89	1,9 ч	β ⁺	2,9	0,511(ан.); 1,626; 3,577; 3,838
	89m	42 мин	β ⁺	3,1	0,511(ан.); 0,588
	90	14,6 ч	β ⁺	1,50	0,142(75);
	—	—	э.з.	—	1,14(97); 2,32(82)
⁹⁰ Ti	90m	24 сек	и.п.	—	0,122(71)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁴¹ Nb	91m	64 дня	и.п. (97) э.з. (3)	—	0,104(0,5); 1,21(3)
	92m	10,16 дня	э.з. (> 99) β ⁺ (0,06)	—	0,934(99)
	93	—	100	—	—
	93m	13,6 года	и.п.	—	—
	94	2·10 ⁴ лет	β ⁻	0,49	0,702(100); 0,871(100)
	94m	6,29 мин	и.п. (> 99) β ⁻ (0,2)	—	0,871(0,2)
	95	35,0 дней	β ⁻	0,160	0,765(100)
	95m	90 ч	и.п.	—	—
	96	23,35 ч	β ⁻	0,7	0,459(28); 0,569(59); 0,778(97); 1,092(49)
	97	72 мин	β ⁻	1,27	0,665(98)
	97m	1,0 мин	и.п.	—	0,747(98)
	98	51 мин	β ⁻	3,1	0,720(75); 0,787(100); 1,16(30)
	99	2,4 мин	β ⁻	3,2	0,100/1/; 0,260/1/
	100	3,0 мин	β ⁻	—	0,36/55/; 0,45/40/; 0,53**/100/
⁴² Mo	88	27 мин	β ⁺	2,5	0,511(ан.); 2,69
	89	7 мин	β ⁺	4,9	0,511(ан.)
	90	5,67 ч	э.з. (75) β ⁺ (25)	—	0,122(71); 0,257(85); 0,511(50, ан.)
	91	15,49 мин	β ⁺	3,44	0,511(ан.)
	91m	64 сек	и.п. (~57) β ⁺ (~43)	3,99/15/; 2,78/100/	0,658(54); 1,21(22); 1,53(15)
	92	—	15,86	—	—
	93	> 10 ³ лет	э.з.	—	—
	93m	6,95 ч	и.п.	—	0,264(58); 0,685(100); 1,479(100)
	94	—	9,12	—	—
	95	—	15,70	—	—
	96	—	16,50	—	—
	97	—	9,45	—	—
	98	—	23,75	—	—
	99	66,7 ч	β ⁻	1,23	0,181(7); 0,740(12); 0,780(4)
	100	—	9,62	—	—
	101	14,6 мин	β ⁻	2,23	0,191(25); 0,59(21); 1,02(25)
	102	11,5 мин	β ⁻	1,2	—
	103	62 сек	β ⁻	—	—
	104	1,1 мин	β ⁻	4,8	0,070
	105	40 сек	β ⁻	—	—
⁴³ Tc	92	4,4 мин	β ⁺ (~92) э.з. (~8)	4,1	0,14(67); 0,33(90); 0,511(184, ан.); 0,79(95); 1,54(100)
	93	2,75 ч	э.з. (87) β ⁺ (13)	—	0,511(26, ан.); 1,35(65); 1,49(33)
	93m	43 мин	и.п. (82) э.з. (18)	0,80	0,390(63); 2,66(18)
	94	293 мин	э.з. (89) β ⁺ (11)	—	0,511(22, ан.); 0,702(100); 0,849(100); 0,871(100)
	94m	53 мин	β ⁺ (66) э.з. (34)	2,47	0,511(132, ан.); 0,871(91); 1,53(10); 1,87(9)
	95	20,0 ч	э.з.	—	0,768(82); 0,84(11)
	95m	61 день	э.з. (95) β ⁺ (0,42)	—	0,204(70); 0,584(36); 0,838(27)
	96	4,35 дня	и.п. (4) э.з.	0,68	—
	96m	52 мин	и.п.	—	0,778(100); 0,81(84); 0,851(100); 1,12(16)
	97	2,6·10 ⁶ лет	э.з.	—	—
	97m	91 день	и.п.	—	—
	98	1,5·10 ⁶ лет	β ⁻	0,30	0,66(100); 0,76(100)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁴³ Tc	99	2,12 · 10 ⁵ лет	β ⁻	0,292	—
	99 _m	6,05 ч	и.п.	—	0,140(90)
	100	15,8 сек	β ⁻	3,38	0,540; 0,60
	101	14,0 мин	β ⁻	1,32	0,307(91); 0,545(8)
	102	4,5 мин	β ⁻	2	0,47
	103	50 сек	β ⁻	2,2	0,135/17; 0,21/10/
	104	18 мин	β ⁻	4,6	—
	105	7,7 мин	β ⁻	3,4	0,110
	106	37 сек	β ⁻	—	—
	107	29 сек	β ⁻	—	—
⁴⁴ Ru	94	57 мин	э.з.	—	—
	95	1,65 ч	э.з. (85)	—	0,340(70); 0,511(30, ан.);
	—	—	β ⁺ (15)	1,33	0,625(13); 1,09(21)
	96	—	5,46	—	—
	97	2,88 дня	э.з.	—	0,215(91); 0,324(8)
	98	—	1,868	—	—
	99	—	12,63	—	—
	100	—	12,53	—	—
	101	—	17,02	—	—
	102	—	31,6	—	—
	103	39,5 дня	β ⁻	0,70(3); 0,21	0,497(88); 0,610(6)
	104	—	18,87	—	—
	105	4,44 ч	β ⁻	1,87(11); 1,15	0,317*(11); 0,475*(20); 0,67*(16);
	106	368 дней	β ⁻	0,039	0,726(48)
	107	4,2 мин	β ⁻	3,2	0,195(14); 0,86 (7)
	108	4,5 мин	β ⁻	1,3	0,165(28)
⁴⁵ Rh	97	32 мин	β ⁺	2,47	—
	98	8,7 мин	β ⁺	2,5	0,65(100)
	99	4,7 ч	э.з. (90)	—	0,34(70);
	—	—	β ⁺ (10)	0,74	0,511(20, ан.); 0,62(20)
	100	20,8 ч	э.з. (93)	—	0,511(13, ан.); 0,540(88);
	—	—	β ⁺ (7)	2,62	0,820(25); 2,37(39)
	101	3,0 года	э.з.	—	0,127(88); 0,198(75); 0,325(11)
	101 _m	4,4 дня	э.з. (90)	—	0,307(83); 0,545(6)
	—	—	и.п. (10)	—	—
	102	206 дней	э.з.	—	0,475(57); 0,511(25, ан.)
	—	—	β ⁺	1,29	—
	—	—	β ⁻	1,15	—
	103	—	100	—	—
	103 _m	57,5 мин	и.п.	—	0,040(0,4)
	104	43 сек	β ⁻	2,44	0,56(2); 1,24(0,13)
	104 _m	4,41 мин	и.п. (> 99)	—	0,051(47); 0,078(2,5);
	—	—	β ⁻ (0,18)	—	0,097(2,6)
	105	35,88 ч	β ⁻	0,568	0,306(5); 0,319(19)
	105 _m	45 сек	и.п.	—	0,129
	106	30 сек	β ⁻	3,54	0,512(21); 0,622*(11)
	107	21,7 мин	β ⁻	1,20	0,305(73); 0,390(11)
	108	16,8 сек	β ⁻	4,5	0,434(43); 0,51*(10); 0,62(22)
	110	5 сек	β ⁻	5,5	0,374
⁴⁶ Pd	99	22 мин	β ⁺	2,0	—
	100	4,0 дня	э.з.	—	0,074(34); 0,084(49); 0,126(16)
	101	8,4 ч	э.з. (97,5)	—	0,296(30); 0,590(24)
	—	—	β ⁺ (2,5)	0,78	—
	102	—	0,96	—	—
	103	17,0 дней	э.з.	—	0,297(0,011); 0,362(0,06); 0,498(0,011)
	104	—	10,97	—	—
	105	—	22,2	—	—
	106	—	27,3	—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁴⁶ Pd	107	~7·10 ⁸ лет	β ⁻	0,04	—
	107m	21,3 сек	и.п.	—	0,21
	108	—	26,7	—	—
	109	13,47 ч	β ⁻	1,028	0,088(5); 0,60(0,03)
	109m	4,69 мин	и.п.	—	0,188(58)
	110	—	11,8	—	—
	111	22 мин	β ⁻	2,2	0,38/5/; 0,60*/13/; 1,4*/8/
	111m	5,5 ч	и.п. (75)	—	0,17
	—	—	β ⁻ (25)	2,0	—
	112	21,0 ч	β ⁻	0,28	0,019(20)
	113	1,4 мин	β ⁻	—	—
	115	45 сек	β ⁻	—	—
⁴⁷ Ag	103	66 мин	β ⁺	1,6	0,12*/26/; 0,15/23/;
	—	—	э.з. (~70)	—	0,27/34/; 0,511/100, ан./.
	103m	5,7 сек	и.п.	—	0,138
	104	66 мин	β ⁺	0,99	0,556(84); 0,764(48);
	—	—	э.з.	—	0,854(30)
	104m	29,8 мин	β ⁺	2,70	0,511(120, ан.);
	—	—	э.з.	—	0,556(100)
	—	—	и.п.	—	—
	105	40 дней	э.з.	—	0,280(32); 0,344**(42)
	106	23,96 мин	β ⁺	1,96	0,511(140, ан.)
	106m	8,5 дня	э.з.	—	0,512(86); 0,616(23); 0,717**(31);
	—	—	—	—	0,80**(41); 1,046(29)
	107	—	51,35	—	—
	107m	44,3 сек	и.п.	—	0,094(5)
	108	2,42 мин	β ⁻ (97,5)	1,64	0,424(0,45); 0,511(0,56, ан.);
	—	—	э.з. (2,2)	—	0,632(1,7)
	—	—	β ⁺ (0,28)	0,90	—
	108m	> 5 лет	э.з. (90)	—	0,434(89); 0,614(90);
	—	—	и.п. (10)	—	0,722(90)
	109	—	48,65	—	—
	109m	39,2 сек	и.п.	—	0,088(5)
	110	24,4 сек	β ⁻	2,87	0,658(4,5)
	—	—	э.з. (0,3)	—	—
	110m	255 дней	β ⁻ (98,7)	1,5(0,6); 0,53(31); 0,087	0,658(96); 0,764(23); 0,885(71);
	—	—	—	—	0,937(32); 1,384(21)
	—	—	и.п. (1,3)	—	—
	111	7,5 дня	β ⁻	1,05	0,247(1); 0,342(6)
	111m	74 сек	и.п.	—	0,065
	112	3,14 ч	β ⁻	3,94	0,617(41); 1,40(5)
	113	5,3 ч	β ⁻	2,0	0,12/10/; 0,30/100/; 0,67/17/
	114	4,5 сек	β ⁻	4,6	0,57
	115	20,0 мин	β ⁻	3,2	0,14**(12); 0,22**(49); 0,28(13);
	—	—	—	—	1,48(11); 2,12(13)
	116	2,5 мин	β ⁻	5,0	0,52; 0,70
	117	1,1 мин	β ⁻	—	—
⁴⁸ Cd	103	10 мин	β ⁺	—	0,22; 0,511(ан.); 0,63; 0,85
	104	57 мин	э.з.	—	0,084
	105	55 мин	э.з.	—	0,308; 0,320; 0,347;
	—	—	β ⁺	1,69	0,433; 0,511(ан.)
	106	—	1,22	—	—
	107	6,49 ч	э.з. (> 99)	—	0,511(0,56, ан.);
	—	—	β ⁺ (0,28)	0,302	0,796(0,08); 0,829(0,21)
	108	—	0,88	—	—
	109	453 дня	э.з.	—	0,088
	110	—	12,39	—	—
	111	—	12,75	—	—
	111m	48,6 мин	и.п.	—	0,150(30); 0,247(94)
	112	—	24,07	—	—
	113	—	12,26	—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁴⁸ Cd	113m	13,6 года	β ⁻	0,58	0,265 (~ 0,1)
	114	—	28,86	—	—
	115	53,5 ч	β ⁻	1,11	0,262(2); 0,49(10); 0,53(26)
	115m	43 дня	β ⁻	1,62	0,485(0,3); 0,935(1,9); 1,29(0,9)
	116	—	7,58	—	—
	117	2,4 ч	β ⁻	2,23	0,273(31); 0,345(18); 0,434(13); 1,303(19); 1,577(17)
	117m	3,4 ч	β ⁻	0,67	0,273(18); 0,880(10); 1,24** (11); 1,433(10); 1,998(15)
	118	49 мин	β ⁻	—	—
	119	2,7 мин	β ⁻	3,5	—
⁴⁹ In	106	5,3 мин	β ⁺	4,9	0,511(ан.); 0,63; 1,65; 1,85
	107	33 мин	β ⁺	2,2	0,22(46); 0,511(ан.)
	—	—	э.з.	—	—
	108	57 мин	э.з.	—	0,150; 0,175; 0,243;
	—	—	β ⁺	1,29	0,511(ан.); 0,633; 0,872
	109	4,3 ч	э.з. (94)	—	0,205; 0,28**; 0,35**;
	—	—	β ⁺ (6)	0,79	0,65**; 0,91**
	109m ₁	1,3 мин	и.п.	—	0,658
	109m ₂	0,20 сек	и.п.	—	0,40(20); 0,68(100); 1,04(20); 1,43(77)
	110	66 мин	β ⁺ (71)	2,25	0,511(142, ан.); 0,658(95)
	—	—	э.з. (29)	—	0,173(89); 0,247(94)
	111	2,81 дня	э.з.	—	0,511(44, ан.); 0,617(6)
	112	14,4 мин	β ⁻ (44)	0,66	—
	—	—	β ⁺ (22)	1,56	—
	—	—	э.з. (34)	—	—
	112m	20,7 мин	и.п.	—	0,156(9)
	113	—	4,23	—	—
	113m	99,8 мин	и.п.	—	0,393(54)
	114	72 сек	β ⁻ (98)	1,988	1,299(9,17)
	—	—	э.з. (1,9)	—	—
	—	—	β ⁺ (0,004)	0,42	—
	114m	50,0 дней	и.п. (96,5)	—	0,192(17); 0,558(3,5); 0,724(3,5)
	—	—	э.з. (3,5)	—	—
	115	6·10 ¹⁴ лет	95,77	—	—
	—	—	β ⁻	0,48	—
	115m	4,50 ч	и.п. (95)	—	0,335(50)
	—	—	β ⁻ (5)	0,83	—
	116	13,4 сек	β ⁻	3,3	0,434(0,12); 0,95(0,1); 1,293(1,2)
	116m ₁	54,0 мин	β ⁻	1,00	0,417(36); 1,09(53); 1,293(80); 2,111(20)
	116m ₂	2,16 сек	и.п.	—	0,164
	117	45 мин	β ⁻	0,74	0,158(87); 0,565(100)
	117m	1,93 ч	и.п. (47)	—	0,158(14); 0,314(31)
	—	—	β ⁻ (53)	1,78	—
	118	5,7 сек	β ⁻	4,2	1,230(15)
	119	2,1 мин	β ⁻	1,6	0,82(95)
	119m	17,5 мин	β ⁻ (95)	2,7	0,024; 0,30; 0,91*
	—	—	и.п. (5)	—	—
	120	3,2 сек	β ⁻	5,6	1,171(15)
	121	3,1 мин	β ⁻	3,7	—
	122	8 сек	β ⁻	5	0,99; 1,14
	123	36 сек	β ⁻	4,6	—
	124	~ 3,6 сек	β ⁻	5	0,99/3/; 1,13/10/; 3,21/3/
⁵⁰ Sn	108	9,2 мин	э.з.	—	0,28; 0,42
	109	18,1 мин	э.з.	—	0,335; 0,521; 0,89;
	—	—	β ⁺	1,6	1,12
	110	4,0 ч	э.з.	—	0,283(95)
	111	35,0 мин	э.з. (73)	—	0,511(54, ан.); 0,75(1,1); 1,14(1,8); 1,89(1,0)
—	—	—	β ⁺ (27)	1,51	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁵⁰ Sn	112	—	0,95	—	—
	113	115 дней	э.з.	—	0,255 (1,8)
	113 _m	20 мин	и.п. (91)	—	0,079 (0,6)
	—	—	э.з. (9)	—	—
	114	—	0,65	—	—
	115	—	0,34	—	—
	116	—	14,24	—	—
	117	—	7,57	—	—
	117 _m	14,0 дней	и.п.	—	0,158 (87)
	118	—	24,01	—	—
	119	—	8,58	—	—
	119 _m	~ 250 дней	и.п.	—	0,024 (16)
	120	—	32,97	—	—
	121	27,5 ч	β ⁻	0,383	—
	121 _m	76 лет	β ⁻	0,42	0,037
	122	—	4,71	—	—
	123	125 дней	β ⁻	1,42	—
	123 _m	39,5 мин	β ⁻	1,26	0,160
	124	—	5,98	—	—
	125	9,4 дня	β ⁻	2,34	0,811 (1,5); 0,504 (1,4); 1,068 (4); 1,97 (0,6)
	125 _m	9,5 мин	β ⁻	2,04	0,325 (97)
	126	~ 10 ⁵ лет	β ⁻	—	0,060; 0,067; 0,092
	127	4,1 мин	β ⁻	2,7	0,49 (100)
	128	59 мин	β ⁻	0,80	0,044 (7); 0,072 (19); 0,50 (61); 0,57 (22)
	129	9 мин	β ⁻	—	1,15
	130	2,6 мин	β ⁻	—	—
	131	3,4 мин	β ⁻	—	—
	132	2,2 мин	β ⁻	—	—
⁵¹ Sb	112	0,9 мин	β ⁺	—	0,511 (ан.); 1,27
	—	—	э.з.	—	—
	113	6,4 мин	э.з.	—	0,32; 0,511 (ан.); 1,03; 1,2**
	—	—	β ⁺	2,42	0,9; 1,30
	114	3,3 мин	β ⁺	2,7	—
	—	—	э.з.	—	—
	115	31 мин	э.з. (67)	—	0,499 (100); 0,511 (67, ан.); 0,98 (5); 1,24 (5)
	—	—	β ⁺ (33)	1,51	0,511 (56, ан.); 0,93 (26); 1,293 (85); 2,23 (14)
	116	16 мин	э.з. (72)	—	0,099 (30); 0,140 (30); 0,406 (36); 0,511 (38, ан.); 0,545 (68); 0,96 (75); 1,06 (27); 1,293 (100)
	—	—	β ⁺ (28)	2,3	0,158 (87); 0,511 (5, ан.)
	116 _m	60 мин	э.з. (81)	1,16	—
	—	—	β ⁺ (19)	—	—
	117	2,8 ч	э.з. (97,4)	—	—
	—	—	β ⁺ (2,6)	0,57	—
	118	3,5 мин	э.з.	—	0,511 (150, ан.); 0,83 (0,4); 1,230* (3)
	—	—	β ⁺	2,67	0,041 (29); 0,254 (93); 1,049 (100); 1,230 (100)
	118 _m	5,1 ч	э.з. (> 99)	—	0,024 (16)
	—	—	β ⁺ (0,16)	—	0,511 (87, ан.); 1,171 (1,3)
	119	38,0 ч	э.з.	—	—
	120	15,89 мин	β ⁺	1,70	—
	—	—	э.з.	—	—
	121	—	57,25	—	—
	122	2,80 дня	β ⁻ (97)	1,97	0,564 (66); 0,686 (3,4)
	—	—	э.з. (3,0)	—	—
	—	—	β ⁺ (0,006)	0,56	—
	122 _m	4,2 мин	и.п.	—	0,061 (50); 0,075 (17)
	123	—	42,75	—	—
	124	60,4 дня	β ⁻	2,31	0,603 (97); 0,72* (14); 1,692 (50)
	124 _{m1}	93 сек	и.п. (80)	—	0,505 (20); 0,603 (20); 0,644 (20)
	—	—	β ⁻ (20)	1,19	—
	124 _{m2}	21 мин	и.п.	—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁵¹ Sb	125	2,71 года	β ⁻	0,61	0,427 (31); 0,463 (10); 0,599* (24); 0,634 (11)
	126	12,5 дня	β ⁻	1,9	0,41; 0,69**
	127	93 ч	β ⁻	1,5	0,46; 0,68; 0,77
	128	10,8 мин	β ⁻	2,6	0,320 (83); 0,75* (200)
	129	4,3 ч	β ⁻	1,87	0,54; 0,81; 0,91
	130	33 мин	β ⁻	—	0,19; 0,33; 0,82**; 0,94
	131	26 мин	β ⁻	—	0,64 (37); 0,95 (48)
	132	2,1 мин	β ⁻	—	—
	133	4,2 мин	β ⁻	—	—
	135	2 сек	β ⁻	—	—
⁵² Te	107	2,2 сек	α	3,28	—
	108	5,3 сек	α	3,08	—
	—	—	p	2,6; 3,4; 3,7	—
	115	6,0 мин	β ⁺ (~ 80)	2,8	0,511 (160, ан.);
	—	—	э.з. (~ 20)	—	0,72 (34); 1,28 (32); 1,38 (32)
	116	2,50 ч	э.з.	—	0,094
	117	61 мин	э.з. (70)	—	0,511 (60, ан.);
	—	—	β ⁺ (30)	1,81	0,72 (65); 0,93 (6); 1,78 (9)
	118	6,0 дней	э.з.	—	—
	119	15,9 ч	э.з.	—	0,645 (85); 0,70 (11);
	—	—	β ⁺ (5)	0,627	1,76 (3,6)
	119m	4,68 дня	э.з.	—	0,153 (62); 0,270 (25); 1,221 (67); 2,09 (4)
	120	—	0,089	—	—
	121	17 дней	э.з.	—	0,508 (18); 0,573 (80)
	121m	154 дня	и.п. (90)	—	0,212 (82); 1,10 (3)
	—	—	э.з. (10)	—	—
	122	—	2,46	—	—
	123	—	0,87	—	—
	123m	117 дней	и.п.	—	0,159 (84)
	124	—	4,61	—	—
	125	—	6,99	—	—
	125m	58 дней	и.п.	—	0,035 (7); 0,110 (0,3)
	126	—	18,71	—	—
	127	9,4 ч	β ⁻	0,70	0,058 (0,01); 0,21* (0,03); 0,350 (0,05); 0,417 (0,3)
	127m	109 дней	и.п. (99,2)	—	0,059 (0,19); 0,089 (0,08); 0,67 (0,004)
	—	—	β ⁻ (0,8)	—	—
	128	—	31,79	—	—
	129	68,7 мин	β ⁻	1,45	0,027 (19); 0,455 (15)
	129m	34,1 дня	и.п. (64)	—	0,69 (6)
	—	—	β ⁻ (36)	1,60	—
	130	—	34,49	—	—
	131	24,8 мин	β ⁻	2,14	0,150 (68); 0,453 (16)
	131m	30 ч	β ⁻ (82)	2,46 (5); 0,9	0,78** (60); 0,85* (31); 1,127 (13); 1,206 (11)
	—	—	и.п. (18)	—	0,053 (17); 0,230 (90)
	132	77,7 ч	β ⁻	0,22	—
	133	12,5 мин	β ⁻	—	—
	133m	50 мин	β ⁻ (87)	2,4	0,432 (50); 0,557 (35); 0,754 (85); 0,91 (57)
	—	—	и.п. (13)	—	0,08 (13); 0,17 (16); 0,204 (21); 0,262 (19)
	134	42 мин	β ⁻	—	—
⁵³ I	117	7 мин	β ⁺	—	0,16; 0,34; 0,511 (ан.)
	118	13,9 мин	β ⁺ (~ 54)	—	0,511 (108, ан.); 0,55;
	—	—	э.з. (~ 46)	—	0,60; 1,15
	119	19,5 мин	β ⁺ (51)	—	0,26; 0,511 (102, ан.); 0,78
	—	—	э.з. (49)	—	0,511 (92, ан.); 0,56;
	120	1,35 ч	э.з. (54)	—	0,62; 1,52
	—	—	β ⁺ (46)	4,0	—
	121	2,12 ч	э.з. (91)	—	0,212 (90); 0,32 (6);

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучение
⁶³ I	—	—	β ⁺ (9)	1,2	0,511 (18, ан.)
	122	3,5 мин	β ⁺	3,1	0,511 (ан.); 0,564; 0,69; 0,78
	123	13,3 ч	э.з.	—	0,159 (83)
	124	4,15 дня	э.з. (74)	—	0,511 (50, ан.); 0,605 (67);
	—	—	β ⁺ (26)	2,14	0,644 (12); 0,73 (14); 1,69 (14)
	125	60,2 дня	э.з.	—	0,035 (7)
	126	12,8 дня	э.з. (55)	—	0,386 (34); 0,667 (33)
	—	—	β ⁻ (44)	1,25	—
	—	—	β ⁺ (1,3)	1,13	—
	127	—	100	—	—
	128	24,99 мин	β ⁻ (93,6)	2,12	0,441 (14); 0,528 (1,4)
	—	—	э.з. (6,4)	—	—
	129	1,7·10 ⁶ лет	β ⁻	0,150	0,040 (9)
	130	12,3 ч	β ⁻	1,7 (0,4); 1,04	0,419 (35); 0,538 (99); 0,669 (100);
	—	—	—	—	0,743 (87)
	131	8,05 дня	β ⁻	0,806 (0,6); 0,606	0,284 (5,4); 0,364 (82); 0,637 (6,8)
	132	2,26 ч	β ⁻	2,12	0,52** (20); 0,67** (144);
	—	—	—	—	0,773 (89); 0,955 (22)
	133	20,3 ч	β ⁻	1,27	0,53 (90)
	134	52,0 мин	β ⁻	2,43	0,61 (18); 0,85 (95);
	—	—	—	—	0,89 (65); 1,15 (10)
	135	6,68 ч	β ⁻	1,4	1,14 (37); 1,28 (34); 1,46 (12);
	—	—	—	—	1,72 (19)
	136	83 сек	β ⁻	7,0 (~ 6); 5,6	0,27 (18); 0,39 (19); 1,32** (95);
	—	—	—	—	2,3** (19)
	137	22,0 сек	β ⁻	—	—
	—	—	β ⁻ , n (~ 6)	—	—
	138	5,9 сек	β ⁻	—	—
	139	2,7 сек	β ⁻	—	—
⁵⁴ Xe	118	6 мин	β ⁺	—	0,05; 0,511 (ан.)
	119	6 мин	β ⁺	—	0,10
	120	40 мин	э.з.	—	0,055; 0,073; 0,176; 0,76
	121	39 мин	β ⁺	2,8	0,080; 0,096; 0,132; 0,437; 0,511 (ан.)
	122	20,1 ч	э.з.	—	0,060; 0,090; 0,110; 0,148; 0,180;
	—	—	—	—	0,345
	123	2,08 ч	э.з.	—	0,090; 0,110; 0,149; 0,178; 0,329;
	—	—	—	—	0,511 (ан.); 0,68; 0,90; 1,10
	124	—	β ⁺	1,51	—
	125	16,8 ч	э.з.	—	0,055; 0,188; 0,242
	125m	55 сек	и.п.	—	0,075; 0,111
	126	—	0,090	—	—
	127	36,41 дня	э.з.	—	0,172 (22); 0,203 (65); 0,375 (20)
	127m	75 сек	и.п.	—	0,125; 0,175
	128	—	1,919	—	—
	129	—	26,44	—	—
	129m	8,0 дней	и.п.	—	0,040 (9); 0,197 (6)
	130	—	4,08	—	—
	131	—	21,18	—	—
	131m	11,8 дня	и.п.	—	0,164 (2)
	132	—	26,89	—	—
	133	5,27 дней	β ⁻	0,346	0,081 (37)
	133m	2,26 дней	и.п.	—	0,233 (14)
	134	—	10,4	—	—
	135	9,14 ч	β ⁻	0,92	0,250 (91); 0,61 (3)
	135m	15,6 мин	и.п.	—	0,527 (80)
	136	—	8,87	—	—
	137	3,9 мин	β ⁻	4,1	0,455 (33)
	138	17,5 мин	β ⁻	2,4	0,16/33/; 0,26/100/; 0,42/40/;
	—	—	—	—	1,78/66/; 2,02/58/
	139	43 сек	β ⁻	—	0,18/41/; 0,22/100/; 0,30/57/;
	—	—	—	—	1,15/23/

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁵⁴ Xe	140	16,0 сек	β ⁻	—	0,13
	141	1,7 сек	β ⁻	—	—
	142	~ 1,5 сек	β ⁻	—	—
	143	1,0 сек	β ⁻	—	—
	144	~ 1 сек	β ⁻	—	—
⁵⁵ Cs	123	8,0 мин	β ⁺	—	—
	125	45 мин	э.з. (51)	—	0,112; 0,511 (98, ан.)
	—	—	β ⁺ (49)	2,05	—
	126	1,6 мин	β ⁺ (82)	3,8	0,386 (38); 0,511 (164, ан.)
	—	—	э.з. (18)	—	—
	127	6,2 ч	э.з. (96,5)	—	0,125 (10); 0,406 (72);
	—	—	β ⁺ (3,5)	1,08	0,511 (7, ан.)
	128	3,8 мин	β ⁺ (~ 51)	2,9	0,441 (27); 0,511 (110, ан.)
	—	—	э.з. (~ 49)	—	—
	129	32,1 ч	э.з.	—	0,375 (48); 0,416 (25); 0,550 (5)
	130	30 мин	β ⁺	1,97	0,54; 0,59
	—	—	э.з.	—	—
	—	—	β ⁻	0,442	—
	131	9,70 дней	э.з.	—	—
	132	6,59 дней	э.з. (97)	—	0,48* (4); 0,668 (99)
	—	—	β ⁺ (0,6)	0,40	—
	—	—	β ⁻ (2)	—	—
	133	—	100	—	—
	134	2,046 лет	β ⁻	0,662	0,57** (23); 0,605 (98); 0,796** (99)
	134m	2,895 ч	н.п.	—	0,128 (14)
	—	—	β ⁻ (~ 1)	0,55	—
	135	3,0·10 ⁸ лет	β ⁻	0,21	—
	135m	53 мин	н.п.	—	0,781 (100); 0,840 (96)
	136	13,7 дня	β ⁻	0,657 (7); 0,341	0,16** (36); 0,340 (53); 0,818 (100);
	—	—	—	—	1,05 (82)
	137	30,0 лет	β ⁻	1,176 (7); 0,514	0,662 (85)
	138	32,2 мин	β ⁻	3,40	0,463 (23); 1,01 (25); 1,426 (73);
	—	—	—	—	2,21 (18)
	139	9,5 мин	β ⁻	—	1,28
	140	66 сек	β ⁻	—	0,59; 0,88; 1,14; 1,62; 1,85; 2,06;
	—	—	—	—	2,32; 2,72; 3,15
	141	24 сек	β ⁻	—	—
	142	2,3 сек	β ⁻	—	—
⁵⁶ Ba	125	6,5 мин	—	—	—
	126	97 мин	э.з.	—	0,23/100/; 0,70/33/
	127	10 мин	β ⁺	—	—
	128	2,43 дня	э.з.	—	0,134; 0,278
	129	2,61 ч	э.з. (94)	—	0,129/26/; 0,182/100/;
	—	—	β ⁺ (6)	1,42	0,21**/65/; 1,45/42/
	130	—	0,101	—	—
	131	12,0 дней	э.з.	—	0,124** (28); 0,216 (19); 0,373 (13);
	—	—	—	—	0,496** (48)
	131m	14,6 мин	н.п.	—	0,107 (40)
	132	—	0,097	—	—
	133	7,2 года	э.з.	—	0,080** (36); 0,302 (14); 0,356 (69)
	133m	38,9 ч	н.п.	—	0,276 (17)
	134	—	2,42	—	—
	135	—	6,59	—	—
	135m	28,7 ч	н.п.	—	0,268 (16)
	136	—	7,81	—	—
	136m	0,32 сек	н.п.	—	0,164 (40); 0,818 (100); 1,05 (100)
	137	—	11,32	—	—
	137m	2,554 мин	н.п.	—	0,662 (89)
	138	—	71,66	—	—
	139	82,9 мин	β ⁻	2,3	0,166 (23); 1,43 (0,4)
	140	12,80 дней	β ⁻	1,02	0,030 (11); 0,537 (34)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁵⁶ Ba	141	18 мин	β ⁻	3,0	0,193/100/; 0,28/50/; 0,46**/30/;
	142	11 мин	β ⁻	1,7	0,64/20/
	143	12 сек	β ⁻	—	0,080/30/; 0,26/100/; 0,89/40/;
⁵⁷ La	126	1,0 мин	β ⁺	—	1,20/35/
	127	3,5 мин	β ⁺	—	—
	128	4,2 мин	β ⁺	—	0,256; 0,511 (ан.)
	129	10,0 мин	β ⁺	—	—
	—	э.з.	—	—	0,279; 0,511 (ан.)
	130	8,7 мин	β ⁺	—	—
	—	э.з.	—	—	0,356; 0,45; 0,511 (ан.);
	131	56 мин	э.з. (72)	—	0,55; 0,72; 0,81; 0,91; 1,01; 1,19;
	—	β ⁺ (28)	—	1,94	1,45; 1,55
	132	4,5 ч	β ⁺	3,8	0,115 (23); 0,364 (20);
	133	4,0 ч	э.з.	—	0,417 (20); 0,511 (56, ан.)
	134	6,8 мин	β ⁺	1,2	0,47; 0,511 (ан.); 0,56; 0,66; 1,03;
	135	19,4 ч	э.з.	—	1,22; 1,58; 1,92
	136	9,5 мин	э.з. (~ 67)	—	0,511 (ан.); 0,8
	—	β ⁺ (~ 33)	—	1,9	—
	137	6·10 ⁴ лет	э.з.	—	—
	138	1,12·10 ¹¹ лет	0,089	—	0,81 (30); 1,426 (70)
	—	э.з. (~ 70)	—	—	—
	—	β ⁻ (~ 30)	—	0,21	—
	139	—	99,911	—	—
	140	40,22 ч	β ⁻	2,175 (6); 1,69 (15); 1,36	0,329 (20); 0,487 (40); 0,815 (19);
⁵⁸ Ce	141	3,87 ч	β ⁻	2,43	0,923 (10); 1,596 (96); 2,53 (3)
	142	92,5 мин	β ⁻	4,51	1,37 (2)
	143	14,0 мин	β ⁻	3,3	0,65 (48); 0,90 (9); 1,91 (9); 2,41 (15);
	—	—	—	—	2,55 (11)
	—	—	—	—	0,62/100/; 0,80/44/; 1,07/26/;
	—	—	—	—	1,17/57/; 1,58/28/; 1,98/35/; 2,56/27/
	129	~ 13 мин	—	—	0,080; 0,32; 0,75
	130	30 мин	—	—	0,13
	132	4,2 ч	э.з.	—	0,18
	133	6,3 ч	э.з.	—	0,511 (ан.); 1,8
	—	—	β ⁺	1,3	—
	134	72,0 ч	э.з.	—	—
	135	17,0 ч	э.з.	—	0,265/100/; 0,300/56/;
	—	—	β ⁺ (< 1)	0,81	0,52**/46/; 0,59**/98/
	136	—	0,193	—	—
	137	9,0 ч	э.з. (> 99)	—	0,446** (2,3); 0,481** (0,06);
	—	—	β ⁺ (< 0,009)	—	0,698 (0,04); 0,92** (0,10)
^{137m} Ba	137m	34,4 ч	н.п. (99,4)	—	0,168 (0,4); 0,255 (11);
	—	—	э.з. (0,6)	—	0,762 (0,16); 0,825** (0,5)
	138	—	0,250	—	—
	139	140 дней	э.з.	—	0,165 (80)
	139m	54 сек	н.п.	—	0,746 (93)
	140	—	88,48	—	—
	141	32,5 дня	β ⁻	0,581	0,145 (48)
	142	—	11,07	—	—
	143	33 ч	β ⁻	1,39	0,057 (11); 0,293 (46); 0,668 (7);
	—	—	—	—	0,725 (8)
	144	284 дня	β ⁻	0,31	0,080 (2); 0,134 (11)
¹⁴⁵ La	145	3,0 мин	β ⁻	2,0	—
	146	14 мин	β ⁻	0,7	0,110/20/; 0,142/42/; 0,22/50/;
	—	—	—	—	0,27/12/; 0,32/100/

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁶⁸ Ce	147	65 сек	β ⁻	—	—
	148	~ 43 сек	β ⁻	—	—
⁶⁹ Pr	134	17 мин	β ⁺	—	0,22; 0,30; 0,409; 0,511 (ан.); 0,639; 0,96
	135	22 мин	β ⁺	2,5	0,080; 0,22; 0,30; 0,511 (ан.)
	136	1,2 ч	э.з. (~ 67)	—	0,511 (66, ан.)
	137	1,5 ч	β ⁺ (~ 33)	2,0	—
	138	2,10 ч	э.з. (73)	1,7	0,511 (54, ан.)
	139	4,5 ч	β ⁺ (27)	—	—
	140	3,39 мин	э.з. (77)	1,65	0,298 (77); 0,40 (9); 0,511 (46, ан.); 0,79(100); 1,04 (100)
	141	—	β ⁺ (23)	—	0,511 (18, ан.); 1,35 (0,5); 1,61(0,3)
	142	19,2 ч	β ⁺ (11)	1,09	0,511 (100, ан.); 1,596 (0,3)
	143	13,59 дня	э.з. (50)	2,32	—
	144	17,27 мин	β ⁺ (50)	2,16	1,57 (3,7)
	145	5,98 ч	100	0,933	—
	146	24 мин	β ⁻	2,99	0,695 (1,5); 1,487 (0,29); 2,186 (0,7)
	147	12 мин	β ⁻	1,80	0,072; 0,68; 0,75; 0,92; 0,98; 1,05; 1,16
	148	2,0 мин	β ⁻	3,7	0,455 (77); 0,74 (16); 0,78 (15); 1,51 (27)
	149	2,3 мин	β ⁻	2,1	0,078 (17); 0,127 (9); 0,32** (47); 0,56(39); 0,61(10); 0,65(24); 1,26(11)
				4,2	0,30
				2,8	0,08; 0,155; 0,325; 0,36; 0,745
⁶⁰ Nd	137	55 мин	β ⁺	3	0,109; 0,511 (ан.); 0,55**
	138	22 мин	β ⁺	2,4	—
	139[2]	29,7 мин	β ⁺	—	0,41
	139m	5,5 ч	и.п.	—	0,114/80/; 0,327/50/;
	140	3,3 дня	β ⁺	3,1	0,511/1400/; 0,73**/210/;
	141	2,42 ч	э.з.	—	0,82**/70/; 0,983/70/
	142	—	э.з.	—	—
	143	—	э.з. (96)	—	0,145 (0,2); 0,511 (6, ан.); 1,14 (2); 1,30 (1)
	144	64 сек	β ⁺ (4)	0,79	0,755
	145	—	и.п.	—	—
	146	—	27,13	—	—
	147	—	12,20	—	—
	148	2,4 · 10 ¹⁵ лет	α	1,83	—
	149	—	23,87	—	—
	150	—	8,29	—	—
	151	—	17,18	—	—
	152	—	β ⁻	0,81	0,091 (28); 0,319 (3); 0,43** (4); 0,533 (13)
⁶¹ Pm	141	22 мин	β ⁺ (57)	2,6	0,195 (13); 0,511 (114, ан.)
	142	40 сек	э.з. (43)	—	—
	143	0,73 года	β ⁺ (~ 95)	3,78	0,511 (190, ан.)
	144	0,96 года	э.з. (~ 5)	—	—
	145	17,7 года	э.з.	—	0,742(47)
	146	—	э.з.	—	0,474 (45); 0,615 (99); 0,695 (99)
			α (3 · 10 ⁻⁷)	2,24 [2]	0,067 (1,0); 0,072 (2,3)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁶¹ Pm	146	4,4 года	э.з. (65)	—	0,453 (65); 0,75* (65)
	—	—	β ⁻ (35)	0,78	—
	147	2,62 года	β ⁻	0,224	—
	148	5,4 дня	β ⁻	2,48	0,551 (27); 0,914 (15); 1,465 (23)
	148m	41,8 дня	β ⁻ (93)	0,69	0,551 (95); 0,630 (87);
	—	—	и п. (7)	—	0,727 (36)
	149	53,1 ч	β ⁻	1,07	0,286 (2); 0,58 (0,1); 0,85 (0,2)
	150	2,68 ч	β ⁻	3,05	0,334 (71); 0,831 (18); 1,165 (23);
	—	—	—	—	1,33 (22)
	151	27,8 ч	β ⁻	1,19	0,17** (18); 0,340 (21)
	152	6,5 мин	β ⁻	2,2	0,122; 0,245
	153	5,5 мин	β ⁻	1,65	0,12; 0,18
	154	2,5 мин	β ⁻	2,5	—
⁶² Sm	140 [2]	14,7 мин	—	—	0,23; 0,14
	141 [2]	23 мин	э.з.	—	0,20; 0,43; 0,78
	—	—	β ⁺	—	—
	142	73 мин	э.з. (~ 50)	—	0,15—0,35**;
	—	—	β ⁺ (~ 50)	1,03 [2]	0,511 (100, ан.)
	143	9,0 мин	э.з. (52)	—	0,511 (100, ан.)
	—	—	β ⁺ (48)	2,5 [2]	—
	143m	64 сек	и п.	—	0,748
	144	—	3,16	—	—
	145	340 дней	э.з.	—	0,061; 0,485 (3 · 10 ⁻³)
	146	7 · 10 ⁷ лет	α	2,46	—
	147	1,05 · 10 ¹¹ лет	α	2,23	—
	—	—	15,07	—	—
	148	—	11,27	—	—
	149	—	13,82	—	—
	150	—	7,47	—	—
	151	~ 87 лет	β ⁻	0,076	0,022 (4)
	152	—	26,63	—	—
	153	46,8 ч	β ⁻	0,80	0,070 (5,4); 0,103 (28)
	154	—	22,53	—	—
	155	23,5 мин	β ⁻	1,53	0,104 (73); 0,246 (4)
	156	9,4 ч	β ⁻	0,72	0,088 (30); 0,166 (10); 0,204 (20)
⁶³ Eu	142 [2]	1,2 мин	э.з.	—	0,77; 1,03
	—	—	β ⁺	—	—
	143	2,3 мин	β ⁺	4,0	0,511 (ан.)
	144	10,5 сек	β ⁺	5,2	0,511 (ан.)
	145	5,9 дня	э.з. (99)	—	0,656/30; 0,894/100;
	—	—	β ⁺ (1)	1,7 [2]	1,66/16/
	146	4,59 дня	э.з. (96,5)	—	0,511 (7, ан.);
	—	—	β ⁺ (3,5)	1,47 (3,3); 2,11 (0,14);	0,634* (77); 0,749 (100)
	147	21,5 дня	э.з. (99,5)	—	0,122 (20); 0,198 (24);
	—	—	β ⁺ (0,5)	—	0,680 (11); 0,957 (9);
	—	—	α (0,002)	2,91	1,079 (9)
	148	54 дня	э.з. (> 99)	—	0,551** (120);
	—	—	β ⁺ (0,13)	0,92	0,62** (90);
	—	—	α (9 · 10 ⁻⁷)	2,63	0,72** (18)
	149	106 дней	э.з.	—	0,277/10; 0,328/10/
	150	12,55 ч	β ⁻ (90)	1,01	0,334 (4); 0,406 (3);
	—	—	э.з. (9)	—	0,511 (0,8, ан.)
	—	—	β ⁺ (0,4)	1,24	—
	151	—	47,77	—	—
	152	12,7 года	э.з. (72)	—	0,122 (37); 0,344 (27);
	—	—	β ⁻ (28)	1,48	0,965 (15); 1,408 (22)
^{152m}	—	—	β ⁺ (0,021)	0,71	—
	152m ₁	9,3 ч	β ⁻ (77)	1,88	0,842 (13); 0,963 (12);
	—	—	э.з. (23)	—	0,122 (8)
	—	—	β ⁺ (0,011)	0,89	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁶³ Eu	152 m_2	96 мин	и.п.	—	0,090 (74)
	153	—	52,23	—	—
	154	16 лет	β ⁻	1,85 (10); 0,87	0,123 (38); 0,724 (21); 0,876 (12); 1,00* (31); 1,278 (37)
	155	1,811 года	β ⁻	0,25	0,087 (32); 0,105 (20)
	156	15,4 дня	β ⁻	2,45	0,089 (8); 0,812 (9); 1,07** (11); 1,15** (14); 1,24** (16)
	157	15,1 ч	β ⁻	1,3	0,064 (27); 0,37* (14); 0,413 (27)
	158	46 мин	β ⁻	2,5	0,080/100; 0,52**/25; 0,95**/95; 1,19/16/
	159	18,1 мин	β ⁻	2,6	0,07 (42); 0,09 (18); 0,15 (14); 0,67 (21)
	160[2]	40 сек	β ⁻	—	0,075; 0,17
⁶⁴ Gd	145	25 мин	э.з.	—	0,511 (ан); 0,80/9;
	—	—	β ⁺	2,4	1,03/10/; 1,75/100/
	146	50 дней	э.з.	—	0,078/30; 0,115**/100; 0,155/45/
	147	35 ч	э.з.	—	0,229/150; 0,39**/85; 0,64**/70; 0,77**/60; 0,932/60/
	148	84 года	α	3,18	—
	149	9,5 дня	э.з. (> 99)	—	0,150 (48); 0,299 (26);
	—	—	α (~ 0.0007)	3,01	0,347 (25); 0,750 (11)
	150	2,1 · 10 ⁶ лет	α	2 73	—
	151	120 дней	э.з.	—	0,0216(3); 0,154 (7);
	—	—	α (~ 8 · 10 ⁻²)	2,60	0,175 (3); 0,244 (7)
	152	1,1 · 10 ¹⁴ лет	α	2,1	—
	—	—	0,20	—	—
	153	242 дня	э.з.	—	0,070 (2,4); 0,099** (55)
	154	—	2,15	—	—
	155	—	14,7	—	—
	156	—	20,47	—	—
	157	—	15,68	—	—
	158	—	24,9	—	—
	159	18,0 ч	β ⁻	0,95	0,058 (3); 0,363 (9)
	160	—	21,9	1,6	—
	161	3,6 мин	β ⁻	—	0,102 (11); 0,315 (25); 0,361 (66)
	162 [2]	10,4 мин	β ⁻	—	0,41; 0,43
³⁶ Tb	147	24 мин	э.з.	—	0,305; 0,511 (ан.)
	—	—	β ⁺	—	—
	148	70 мин	э.з.	—	0,511 (ан.); 0,78; 1,12
	—	—	β ⁺	4,6	—
	149	4,10 ч	э.з. (84)	—	0,16; 0,35
	—	—	α (~ 16)	3,95	—
	149 m_1	4,3 мин	э.з.	—	—
	—	—	α (0,025)	3,99	—
	150	3,1 ч	э.з.	—	0,511/100, ан./;
	—	—	β ⁺	3,6	0,637/100/;
	—	—	α [2]	3,49 [2]	0,93/35/
	151	18 ч	э.з. (> 99)	—	0,108 (35); 0,252 (35);
	—	—	α (0,0005)	3,42	0,288 (32)
	152	17,4 ч	э.з. (80)	—	0,344/100/; 0,586/14/;
	—	—	β ⁺ (~ 20)	2,82	0,779/14/
	153	55 ч	э.з.	—	0,083** (11); 0,11** (12); 0,212 (30)
	154	21,0 ч	э.з.	—	0,123; 0,248; 0,347; 0,53**; 0,65**
	155	5,6 дня	э.з.	—	0,087 (37); 0,105 (25); 0,180 (8)
	156	5,1 дня	э.з.	—	0,089 (17); 0,199 (40); 0,535 (70);
	—	—	—	—	1,22 (29); 1,42 (15)
	156 m_1	5,5 ч	и.п.	—	0,088
	157	150 лет	э.з.	—	—
	158	1,2 · 10 ³ лет	э.з. (86)	—	0,080 (12); 0,182 (10);
	—	—	β ⁻ (14)	0,85	0,782 (10); 0,95* (69)
	158 m_1	10,5 сек	и.п.	—	0,110 (0,5)

Элемент	A	Период полураспада	тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ -излучения
⁶³ Tb	159	—	100	—	—
	160	72,1 дня	β^-	1,74 (0,4); 0,86	0,087 (12); 0,299 (30); 0,879 (31); 0,966** (31); 1,178 (15)
	161	6,9 дня	β^-	0,59 (10); 0,52	0,026 (21); 0,049 (19); 0,075 (10)
	162	7,48 мин	β^-	1,3; 1,5 [2]	0,180/26/; 0,258/100/; 0,81/44/; 0,89/54/
	163	6,5 ч	β^-	1,65	0,025; 0,235; 0,330; 0,510
	164 [2]	3 мин	β^-	1,0; 2,9	0,17; 0,69
⁶⁶ Dy	149	10—20 мин	э.з.	—	—
	150	7,2 мин	э.з.	—	0,39; 0,511 (ан.)
	—	—	β^+	—	—
	—	—	α	4,23	—
	151	18,0 мин	$\beta^+ + \text{э.з. (94)}$	—	0,145; 0,511 (ан.)
	—	—	$\alpha (6)$	4,06	—
	152	2,41 ч	э.з.	—	0,257
	—	—	$\alpha (0,05)$	3,65	—
	153	6,4 ч	э.з.	—	0,08**; 0,25**
	—	—	$\alpha (0,0030)$	3,48	—
	154	$> 1 \cdot 10^8$ лет	α	2,85	—
	154m	13 ч	α	3,37	—
	155	10,2 ч	э.з.	—	—
	—	—	$\beta^+ (2)$	1,08 (0,14); 0,85 (2)	0,227 (68); 0,52** (8); 1,000 (6); 1,16** (6)
	156	—	0,0524	—	—
	157	8,1 ч	э.з.	—	0,326 (91)
	158	—	0,0902	—	—
	159	144 дня	э.з.	—	0,058 (4); 0,348 ($9 \cdot 10^{-4}$)
	160	—	2,294	—	—
	161	—	18,88	—	—
	162	—	25,53	—	—
	163	—	24,97	—	—
	164	—	28,18	—	—
	165	139,2 мин	β^-	1,29	0,095 (4); 0,361 (1,1)
	165m	1,26 мин	н.п.	—	0,108 (3); 0,514 (1,8)
	—	—	$\beta^- (2,5)$	1,04 (0,4); 0,89	—
	166	81,5 ч	β^-	0,48 (5); 0,40	0,082 (12); 0,372 (0,5); 0,426 (0,5)
	167	4,4 мин	$\beta^- [2]$	—	0,19 — 0,57 [2]
⁶⁷ Ho	151	35,6 сек	$\beta^+ + \text{э.з. (80)}$	—	—
	—	—	$\alpha (20)$	4,51	—
	152	52,3 сек	э.з.	—	—
	—	—	$\alpha (19)$	4,45	—
	153	9 мин	$\alpha (0,3)$	3,92	—
	—	—	э.з.	—	—
	154	7 мин	β^+	—	0,335; 0,511 (ан.)
	155	50 мин	β^+	2,1	0,092; 0,138; 0,511 (ан.)
	156	55 мин	β^+	2,9/1/; 1,8/18/	0,138/100/; 0,266/99/; 0,367/23/; 0,511 (ан.)
	—	—	—	—	0,087; 0,152; 0,190;
	157	14 мин	β^+	—	0,227; 0,511 (ан.)
	158	11,5 мин	э.з.	—	0,099; 0,218; 0,329; 0,412; 0,52;
	—	—	—	—	0,647
	158m	29 мин	н.п.	—	0,099; 0,218; 0,356;
	—	—	β^+	1,32	0,412
	159	33 мин	э.з.	—	0,057; 0,080; 0,13; 0,253; 0,309
	159m	6,9 сек	н.п.	—	0,206
	160	25,6 мин	э.з. (> 99)	—	0,73; 0,96 [2]
	—	—	$\beta^+ (\sim 0,4)$	—	—
	160m	5,0 час	н.п. (66)	—	0,197 (20); 0,646 (20);
	—	—	э.з. } (34)	1,9	0,729 (50); 0,880 (26);
	161	2,4 час	β^+	—	0,965** (37)
	161m	6,1 сек	э.з.	—	0,026 (23); 0,075 (15)
	—	—	н.п.	—	0,211 (53)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁶⁷ No	162	15 мин	э.з. (95)	—	0,081 (8); 0,511 (9, ан.)
	—	—	β ⁺ (5)	1,10	—
	162m	68 мин	н.п. (63)	—	0,185 (26); 0,940 (13);
	—	—	э.з. (37)	—	1,224 (24)
	163 [2]	~ 30 лет	э.з.	—	—
	163m	1,1 сек	н.п.	—	0,305
	164	36,7 мин	β ⁻ (53)	0,99	0,073; 0,091
	—	—	э.з. (47)	—	—
	165	—	100	—	—
	166	26,9 ч	β ⁻	1,84	0,081 (5,4); 1,380 (0,9)
	166m	1,2·10 ³ лет	β ⁻	—	0,184 (90); 0,280 (30);
	—	—	—	—	0,711 (58); 0,810 (60)
⁶⁸ Er	152	10,7 сек	α (~ 90)	4,80	—
	153	36 сек	α (> 75)	4,67	—
	—	—	э.з. }	—	—
	—	—	β ⁺ } (25)	—	—
	154	5 мин	α	4,15	—
	157	~ 25 мин	β ⁺	—	0,117; 0,386; 0,511 (ан.); 1,32
	158	2,3 ч	э.з.	—	0,072; 0,250; 0,315;
	—	—	β ⁺	0,8	0,387; 0,511 (ан.); 0,875
	159	36 мин	β ⁺ [2]	—	0,37—2,60 [2]
	160	29,4 ч	э.з.	—	—
	161	3,1 ч	β ⁺	1,2	0,211 (9); 0,592 (8); 0,826 (63)
	162	—	0,136	—	—
⁶⁹ Tm	163	75,1 мин	э.з. (> 99)	—	0,43 (0,06); 1,10 (0,04)
	—	—	β ⁺ (0,004)	0,19	—
	164	—	1,56	—	—
	165	10,34 ч	э.з.	—	—
	166	—	33,41	—	—
	167	—	22,94	—	—
	167m	2,3 сек	н.п.	—	0,208 (43)
	168	—	27,07	—	—
	169	9,6 дня	β ⁻	0,34	0,008 (0,3)
	170	—	14,88	—	—
	171	7,52 ч	β ⁻	1,49 (2,3); 1,06	0,112 (25); 0,296 (28); 0,308 (63)
	172	49,5 ч	β ⁻	0,89 (< 10); 0,37	0,407 (40); 0,610 (40)
⁶⁹ Tm	153	1,6 сек	α	5,10	—
	154	3,0 сек	α	5,04	—
	161	32 мин	э.з.	—	0,084; 0,106; 0,112; 0,172
	162	77 мин	э.з.	—	0,102/20/; 0,236/10/
	163	1,8 ч	э.з.	—	0,104/8/; 0,240**/5/
	—	—	β ⁺	1,1	—
	164	2,0 мин	э.з. (50)	—	0,091 (4); 0,511 (100, ан.)
	—	—	β ⁺ (50)	2,94	—
	165	30,1 ч	э.з.	—	0,243/50/; 0,297** (35);
	—	—	β ⁺ (0,007)	0,30	0,807/15/
	166	7,7 ч	э.з. (98,2)	—	0,081; 0,19*; 0,215;
	—	—	β ⁺ (2)	1,94	0,46; 0,60**
⁶⁹ Tm	167	9,6 дня	э.з.	—	0,057 (4); 0,208 (43); 0,532 (2)
	168	85 дней	э.з.	—	0,19** (77); 0,448 (27);
	—	—	—	—	0,73** (40); 0,82** (88)
	169	—	100	—	—
	170	134 дня	β ⁻	0,97	0,084 (3,3)
	171	1,92 года	β ⁻	0,097	0,067

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁶⁹ Tm	172	63,6 ч	β ⁻	1,88	0,079 (5); 0,181 (2,2); 1,09 (7); 1,39 (7); 1,46 (7); 1,53 (6)
	173	8,2 ч	β ⁻	1,3 (2); 0,89	0,399 (89); 0,465 (8)
	174	5,2 мин	β ⁻	1,2	0,176 (67); 0,273 (85); 0,366 (93); 0,50 (15); 0,99 (89)
	175	20 мин	β ⁻	2,0	0,51
	176	1,5 мин	β ⁻	4,2	—
⁷⁰ Yb	154	0,39 сек	α	5,33	—
	155	1,6 сек	α	5,21	—
	162	~24 мин	—	—	0,041 [2]
	164	75 мин	э.з.	—	—
	165	10,5 мин	э.з.	—	0,080; 0,069 [2]
			β ⁺	1,6 [2]	—
	166	57,5 ч	э.з.	—	0,082 (17)
	167	17,7 мин	э.з.	—	0,113** (90); 0,176 (15)
			β ⁺ (0,4)	—	—
	168	—	0,140	—	—
	169	31,8 дня	э.з.	—	0,063 (45); 0,177 (22); 0,198 (35)
	169 m	46 сек	и.п.	—	0,024 [2]
	170	—	3,03	—	—
	171	—	14,31	—	—
	171 m	< 8 дней	и.п.	—	0,019; 0,076
	172	—	21,82	—	—
	173	—	16,13	—	—
	174	—	31,84	—	—
	175	101 ч	β ⁻	0,466	0,114 (1,9); 0,283 (3,7); 0,396 (6,0)
	176	—	12,73	—	—
	176 m	11,7 сек	и.п.	—	0,19; 0,29; 0,39
	177	1,9 ч	β ⁻	1,40	0,122 (3); 0,151 (16); 1,080 (5); 1,241 (3)
	177 m	6,5 сек	и.п.	—	0,104 (65); 0,228 (13)
⁷¹ Lu	155	0,07 сек	α	5,63	—
	156	0,23 сек	α	5,54	—
	167	54 мин	э.з.	—	0,030; 0,278; 0,372; 0,402; 0,511 (ан.)
			β ⁺ (~1)	1,5	0,087 (7); 0,90 (10); 0,99 (13)
	168	7,1 мин	э.з.	—	0,063; 0,111; 0,191; 0,577
			β ⁺ (~12)	1,2	0,029 [2]
	169	34 ч	э.з.	—	0,084 (13)
			β ⁺	1,2	—
	169 m	2,7 мин	и.п.	—	—
	170	2,05 дня	э.з.	—	0,019 (20); 0,668 (14); 0,741 (68)
			β ⁺	2,4	0,071 (0,2)
	170 m	0,7 сек	и.п.	—	0,182 (26); 0,81 (21); 0,90** (45); 1,09 (60)
	171	8,3 дня	э.з.	—	—
			β ⁺ (~0,007)	—	0,079 (14); 0,101 (7); 0,272 (18)
	171 m	76 сек	и.п.	—	0,076 (6); 1,24 (9); 0,067; 0,176; 0,273; 0,994
	172	6,70 дня	э.з.	—	—
			и.п.	—	—
	172 m	3,7 мин	э.з.	—	0,079 (14); 0,101 (7); 0,272 (18)
	173	1,37 года	э.з.	—	0,076 (6); 1,24 (9); 0,067; 0,176; 0,273; 0,994
	174	3,6 года	э.з.	—	—
	174 m	140 дней	и.п.	—	—
	175	—	97,40	—	—
	176	2,2 · 10 ¹⁰ лет	β ⁻	0,43	0,088 (15); 0,202 (85); 0,306 (95)
			2,60	—	—
	176 m	3,69 ч	β ⁻	1,31	0,088 (10)
	177	6,74 дня	β ⁻	0,497	0,113 (2,8); 0,208 (6,1)
	177 m	155 дней	β ⁻ (78) и.п. (22)	0,2 [2]	0,113 (23); 0,208 (62); 0,228 (37); 0,378 (29); 0,418 (21)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁷¹ Lu	178	22 мин	β ⁻	1,50	0,089; 0,214; 0,326; 0,427
	179	4,6 ч	β ⁻	1,35	0,213
	180	2,5 мин	β ⁻	3,3	—
⁷² Hf	157	0,12 сек	α	5,68	—
	158	3 сек	α	5,27	—
	168	22 мин	β ⁺ (~2)	1,7	0,129; 0,17
			э.з.	—	
	169	1,5 ч	э.з.	—	0,115
			β ⁺	1,3	
	170	12,2 ч	э.з.	—	0,120; 0,165; 0,99;
					1,28; 2,03; 2,36; 2,52; 2,94
	171	10,7 ч	э.з.	—	0,122; 0,188; 0,29;
					0,34; 0,47; 0,66; 0,86; 1,07
	172	5 лет	э.з.	—	0,024 (22); 0,082 (10); 0,125** (21)
	173	23,6 ч	э.з.	—	0,13** (96); 0,30** (52);
	174	2·10 ¹⁶ лет	α	2,50	—
			0,163	—	—
	175	70 дней	э.з.	—	0,089 (3,4); 0,343 (85)
	176	—	5,21	—	—
	177	—	18,56	—	—
	177 т	1,1 сек	и.п.	—	0,113 (30); 0,208 (81);
					0,228 (48); 0,378 (37)
	178	—	27,1	—	—
	178 т	4,3 сек	и.п.	—	0,089 (54); 0,214 (75);
					0,326 (94); 0,427 (97)
	179	—	13,75	—	—
	179 т	18,6 сек	и.п.	—	0,217 (94)
	180	—	35,22	—	—
	180 т	5,5 ч	и.п.	—	0,058 (48); 0,215 (82);
					0,333 (93); 0,444 (80)
	181	42,5 дня	β ⁻	0,41	0,133** (48); 0,346 (13); 0,482 (81)
	182	9·10 ⁶ лет	β ⁻	—	0,271 (84)
	183	65 мин	β ⁻	1,6	0,46/58/; 0,82/100/
⁷³ Ta	172	44 мин	β ⁺	—	0,092; 0,208;
			э.з.	—	0,511 (ан.)
	173	3,7 ч	э.з.	—	0,090**; 0,170**;
			β ⁺	—	0,64; 1,00
	174	1,2 ч	э.з.	—	0,091; 0,125; 0,160;
			β ⁺	—	0,205; 0,280; 0,350; 0,511 (ан.)
	175	10,5 ч	э.з.	—	0,08; 0,13; 0,21;
					0,27; 0,35; 0,45; 0,60;
					0,83; 1, 2; 1,4; 1,7
	176	8,0 ч	э.з.	—	0,088; 0,202
	177	56,6 ч	э.з.	—	0,113 (6); 0,208 (1)
	178	9,35 мин	э.з. (99)	—	0,093/100/;
			β ⁺ (1)	0,89	0,511(10, ан.); 1,10/11/; 1,35**/46/
	179	~600 дней	э.з.	—	—
	180	—	0,0123	—	—
	180 т	8,15 ч	э.з. (87)	—	0,093 (4); 0,103 (0,6)
			β ⁻ (13)	0,71	—
	181	—	99,9877	—	—
	182	115,1 дня	β ⁻	1,71 (0,3); 0,522	0,068 (42); 1,122 (34); 1,222 (27)
	182 т	16,5 мин	и.п.	—	0,147 (40); 0,172 (40); 0,184 (20)
	183	5,0 дней	β ⁻	0,62	0,108 (11); 0,161** (17);
					0,246** (33);
					0,30** (11); 0,354 (11)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁷³ Ta	184	8,7 ч	β ⁻	2,64 (0,2); 1,76 (0,9);	0,111 (21); 0,25 (42);
	185	50 мин	β ⁻	1,19	0,30 (24); 0,41 (71); 0,90** (49)
	186	10,5 мин	β ⁻	1,7	0,175 (60)
				2,2	0,20 (74); 0,51 (33); 0,61 (33); 0,73 (48)
⁷⁴ W	173	16,5 мин	э.з.	—	—
	174	31 мин	э.з.	—	—
	175	34 мин	э.з.	—	0,26; 0,80; 1,3; 1,6
	176	2,3 ч	э.з. (> 99)	—	0,034; 0,100
			β ⁺ (~0,5)	—	—
	177	135 мин	э.з.	—	0,20; 0,42; 0,62; 0,83; 1,00
	178	21,5 дня	э.з.	—	—
	179	37,5 мин	э.з.	—	0,031 (22)
	179 m	5,2 мин	и.п.	—	0,222
	180	—	0,135	—	—
	181	140 дней	э.з.	—	0,006 (1); 0,136 (0,1); 0,152 (0,1)
	182	—	26,4	—	—
	183	—	14,4	—	—
	183 m	5,3 сек	и.п.	—	0,053 (11); 0,099 (9)
					0,108 (19)
	184	—	30,6	—	—
	185	75 дней	β ⁻	0,429	—
	185 m	1,62 мин	и.п.	—	0,100/16/; 0,13/70/; 0,17/100/
	186	—	28,4	—	—
	187	23,9 ч	β ⁻	1,31 (15); 0,63	0,479 (23); 0,686 (27)
	188	69,4 дня	β ⁻	0,349	0,227 (0,22); 0,290 (0,40)
	189	11,5 мин	β ⁻	2,5; 2,0	0,258/100/; 0,417/96/
⁷⁵ Re	177	17 мин	β ⁺	—	—
	178	15 мин	β ⁺	3,1	—
	179	20 мин	э.з.	—	—
	180	2,4 мин	β ⁺	1,1	0,11; 0,511 (ан.); 0,88
			э.з.	—	0,365
	181	18 ч	э.з.	—	0,068; 0,100; 1,122;
	182	12,7 ч	э.з.	—	1,189; 1,23**; 2,01; 2,0
			β ⁺ (0,3)	1,74	0,046; 0,053; 0,109**; 0,209
	183	71 день	э.з.	—	0,246; 0,292
	184	38 дней	э.з.	—	0,111; 0,78**; 0,90**
	184 m	169 дней	и.п. (70)	—	0,111; 0,78**;
			э.з. (30)	—	0,90**
	185	—	37,07	—	—
	186	88,9 ч	β ⁻ (95)	1,07	0,137 (9);
			э.з. (5)	—	0,632 (0,032); 0,768 (0,035)
	187	4,3 · 10 ¹⁰ лет	β ⁻	0,003	—
			62,93	—	—
	188	16,7 ч	β ⁻	2,12	0,155 (10); 0,478 (0,6) 0,633 (0,9)
	188 m	18,7 мин	и.п.	—	0,092 (5); 0,106 (10)
	189	24,3 ч	β ⁻	1,00	0,150* (4); 0,187* (3)
⁷⁶ Os	190	2,8 мин	β ⁻	1,6	0,218* (10); 0,245 (4)
					0,191/10/; 0,392/10/
	190 m	2,8 ч	—	—	0,57/10/; 0,83/3/
	191	9,8 мин	β ⁻	1,8	—
	192	6 сек	β ⁻	2,5	0,20; 0,29; 0,37; 0,48; 0,57
					—
	181	23 мин	—	—	—
	182	21,9 ч	э.з.	—	0,180/7/; 0,510/10/

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁷⁶ Os	183	12,0 ч	э. з.	—	0,114(27); 0,382(90)
	183m	9,9 ч	э. з. (~54) и. п. (~46)	—	1,035(6); 1,105**(48)
	184	—	0,018	—	—
	185	93,6 дня	э. з.	—	0,646(80); 0,875**(11)
	186	—	1,59	—	—
	187	—	1,64	—	—
	188	—	13,3	—	—
	189	—	16,1	—	—
	189m	5,7 ч	и. п.	—	—
	190	—	26,4	—	—
	190m	9,9 мин	и. п.	—	0,187 (70); 0,361 (94); 0,502 (98); 0,616 (99)
	191	15,0 дней	β-	0,143	0,129 (25)
	191m	13,0 ч	и. п.	—	—
	192	—	41	—	—
	193	31,5 ч	β-	1,13	0,139 (3); 0,28** (2,1); 0,460 (3,9); 0,558 (2,1)
⁷⁷ Ir	194	6,0 лет	β-	0,053	0,043 (10); 0,078 (0,03)
	195	6,5 мин	β-	2	—
	182	15 мин	э. з.	—	0,133; 0,278; 0,510
	183	0,9 ч	э. з.	—	0,24
	184	3,2 ч	э. з.	—	0,125/100/; 0,267 /200/; 0,392 /90/
	185	14 ч	β+	—	—
	186	15,8 ч	э. з. (97) β+ (3)	1,94	0,101; 0,254 0,137 (45); 0,297 (74); 0,434 (35)
	187	10,5 ч	э. з.	—	0,18 /45/; 0,41 /100/; 0,61 /45/; 0,98 /50/
	188	41,5 ч	э. з. (> 99) β+ (~0,3)	1,66	0,155 (34); 0,633* (29)
	189	13,3 дня	э. з.	—	0,245 (18)
	190	11 дней	э. з.	—	0,187 (51); 0,37** (39); 0,40** (39); 0,518 (39); 0,56** (72); 0,604 (47)
	190m ₁	1,2 ч	и. п.	—	—
	190m ₂	3,2 ч	э. з. (94) и. п. (6)	—	0,187 (66); 0,361 (88); 0,502 (92); 0,616 (93)
	191	—	38,5	—	—
	191m	4,9 сек	и. п.	—	0,129 (25)
	192	74,2 дня	β- (95,5) э. з. (4,5)	0,67	0,296 (29); 0,308 (30); 0,317 (81); 0,468 (49)
	192m ₁	1,42 мин	и. п. (> 99) β- (0,017)	1,5	0,058 (0,005); 0,317 (0,008); 0,612 (0,003)
	192m ₂	> 5 лет	и. п.	—	—
	193	—	61,5	—	—
	193m	11,9 дня	и. п.	—	—
	194	17,4 ч	β-	2,24	0,328 (10); 0,64* (1)
	194m	47 сек	β-	2,3	0,13; 0,32; 0,63
	195	4,2 ч	и. п.	—	—
	196	120 мин	β-	1,0	0,10; 0,13; 0,33; 0,37; 0,43; 0,66 0,356 (94); 0,39 (95); 0,44 (95); 0,522 (99); 0,65 (100)
	197	7 мин	β-	2,0	0,50
	198	50 сек	β-	3,6	0,78
⁷⁸ Pt	174	0,7 сек	α (80) э. з. } (20) β+	6,03	—
	175	2,1 сек	α	5,95	—
	176	6,0 сек	α (1,4) э. з. } (98,6) β+	5,74	—
	177	6,6 сек	α (0,3) э. з. } (> 99) β+	5,51	—
				—	—
				—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁷⁸ Pt	178	21 сек	α (1,3) э. з. } (98,7) β ⁺	5,44	—
	179	33 сек	α (0,1) э. з. } (> 99) β ⁺	5,15	—
	180	50 сек	α (0,3) э. з. } (> 99) β ⁺	5,14	—
	181	51 сек	α (0,0006) э. з. } (> 99) β ⁺	5,02	—
	182	3,0 мин	α (0,02) э. з. } (> 99) β ⁺	4,84	—
	183	6,5 мин	α (0,001) э. з. } (> 99) β ⁺	4,73	—
	184	20 мин	α (0,0015) э. з. } (> 99) β ⁺	4,50	—
	185	1,2 ч	э. з.	—	0,035; 0,63; 1,56
	186	3,0 ч	э. з. α (1,4·10 ⁻⁴)	— 4,23	0,67
	187	2,0 ч	э. з.	—	2,0
	188	10,2 дня	э. з. α (3·10 ⁻⁵)	— 3,93	0,140 /22/; 0,19** /100/; 0,38 /15/
	189	10,9 ч	э. з.	—	0,094 /120/; 0,141/124/; 0,187 /137/; 0,243 /100/; 0,56** /230/; 0,61** /180/; 0,722 /156/
	190	6,9·10 ¹¹ лет	α 0,0127	3,18	—
	191	3,00 дня	э. з.	—	0,36** (5); 0,410 (3); 0,539 (9)
	192	~10 ¹⁵ лет	α	2,6?	—
	193	<500 лет	0,78 э. з.	—	—
	193m	4,3 дня	и. п.	—	—
	194	—	32,9	—	—
	195	—	33,8	—	—
	195m	4,1 дня	и. п.	—	0,099 (11); 0,129 (1)
	196	—	25,2	—	—
	197	18 ч	β ⁻	0,670	0,077 (20); 0,191 (6)
	197m	78 мин	и. п. β ⁻ (3)	— 0,737 (3)	0,279 (2,6); 0,346 (13)
	198	—	7,19	—	—
	199	31 мин	β ⁻	1,69	0,197 (9); 0,32* (8); 0,475* (12); 0,540 (24)
	199m	14,1 сек	и. п.	—	0,393 (90)
	200	11,5 ч	β ⁻	—	—
	201	2,3 мин	β ⁻	2,66	0,15; 0,23; 1,76
⁷⁹ Au	177	1,4 сек	α	6,11	—
	178	2,7 сек	α	5,91	—
	179	7,1 сек	α	5,84	—
	181	10 сек	α	5,60; 5,47	—
	183	44 сек	α	5,34	—
	185	4,33 мин	э. з. β ⁺	—	—
			α (~0,01)	5,07	—
	186	12 мин	э. з.	—	0,16; 0,22; 0,30; 0,40
	187	8 мин	э. з. α [2]	— 4,69 [2]	—
	188	8 мин	э. з. β ⁺	—	0,25; 0,33; 0,63
			э. з.	—	—
	189	30 мин	э. з.	—	0,35; 0,45; 0,71; 0,81 [2]

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁷⁹ Au	190	39 мин	э. з.	—	0,29** /100/; 0,60** /5/
	191	3,2 ч	э. з.	—	0,14 /10/; 0,30 /60/; 0,60 /10/
	192	4,1 ч	э. з.	—	0,137; 0,158; 0,296; 0,308; 0,317
			β ⁺ (~1)	2,2	
	193	15,8 ч	э. з.	—	0,114** (5); 0,18** (11); 0,26* (9)
	193m	3,9 сек	и. п.	—	0,258 (65)
	194	39,5 ч	э. з. (~97)	—	0,294 (12); 0,328 (68)
			β ⁺ (~3)	1,49	
	195	183 дня	э. з.	—	0,099 (10); 0,129 (1)
	195m	30,6 сек	и. п.	—	0,261 (77)
	196	6,18 дня	э. з. (93,8)	—	0,333 (25); 0,356 (94); 0,426 (6)
			β ⁻ (6,2)	0,259 (6)	
	196m	9,7 ч	и. п.	—	0,148 (42); 0,188 (32)
	197	—	100	—	—
	197m	7,2 сек	и. п.	—	0,130 (8); 0,279 (75)
	198	2,697 дня	β ⁻	0,962	0,412 (95); 0,676 (1)
	199	3,15 дня	β ⁻	0,46 (6); 0,30	0,158 (37); 0,208 (8)
	200	48,4 мин	β ⁻	2,2	0,368 (24); 1,227 (23)
	201	26 мин	β ⁻	1,5	0,53
	203	55 сек	β ⁻	1,9	0,69
⁸⁰ Hg	185	50 сек	э. з.	—	—
			α [2]	5,64 [2]	—
	186	1,5 мин	э. з.	—	0,125; 0,27; 0,35; 0,44
	187	3 мин	э. з.	—	0,175; 0,255; 0,40
	188	3,7 мин	э. з.	—	0,14
			α [2]	5,14 [2]	—
	189	9,6 мин	э. з.	—	0,165; 0,24; 0,32; 0,50
	190	20 мин	э. з.	—	0,14**
	191	55 мин	э. з.	—	0,26**
	192	4,8 ч	э. з.	—	0,114 /10/; 0,157 /20/; 0,274 /100/
			β ⁺ (<1)	—	
	193	~6 ч	э. з.	—	0,187; 0,574; 0,762; 0,855; 1,04; 1,08
	193m	10,0 ч	э. з. (84)	—	0,218; 0,258; 0,574
			и. п. (16)	—	
			β ⁺ [2]	1,2 [2]	—
	194	1,9 года	э. з.	—	—
	195	9,5 ч	э. з.	—	0,20**; 0,261; 0,59*
					0,780; 0,930; 1,110; 1,172
	195m	40,0 ч	э. з. (50)	—	0,200 (35); 0,261 (20); 0,560 (20)
			и. п. (50)	—	
	196	—	0,146	—	—
	197	65 ч	э. з.	—	0,077 (18); 0,191 (2)
	197m	24 ч	и. п. (94)	—	0,134 (42); 0,279 (7)
			э. з. (6)	—	
	198	—	10,02	—	—
	199	—	16,84	—	—
	199m	43 мин	и. п.	—	0,158 (53); 0,375 (15)
	200	—	23,13	—	—
	201	—	13,22	—	—
	202	—	29,80	—	—
	203	46,9 дня	β ⁻	0,214	0,279 (77)
	204	—	6,85	—	—
	205	5,5 мин	β ⁻	1,7	0,205
	206	8,1 мин	β ⁻	1,3 [2]	0,31
⁸¹ Tl	191	10 мин	э. з.	—	0,511 (ан.)
			β ⁺	—	—
	192	11 мин	э. з.	—	0,424
	193	23 мин	э. з.	—	0,158; 0,169; 0,178; 0,187; 0,208; 0,216; 0,247; 0,511 (ан)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁸¹ Tl	193m	2,1 мин	и. п.	—	0,365
	194	33,0 мин	э. з.	—	0,427
	194m	32,8 мин	э. з.	—	0,097
	195	1,16 ч	э. з.	—	—
			β ⁺	1,8	—
	195m	3,5 сек	и. п.	—	0,383 (95)
	196	1,84 ч	э. з.	—	0,426
	196m	1,41 ч	э. з. (96)	—	0,426
			и п. (4)	—	—
	197	2,84 ч	э. з.	—	0,152; 0,426
	197m	0,54 сек	и. п.	—	0,222 (40); 0,385 (90)
	198	5,3 ч	э. з.	—	0,412(90); 0,65** (40);
			β ⁺ (~0,7)	2,4	1,20 (21); 1,42 (24)
	198m	1,87 ч	и. п. (55)	—	0,283(30); 0,412 (45);
			э. з. (45)	—	0,586 (35); 0,635 (35)
	199	7,4 ч	э. з.	—	0,158 (5); 0,208 (12); 0,247 (9);
				—	0,455 (14)
	200	26,1 ч	э.з.	—	0,368 (88);
			β ⁺ (0,37)	1,44 (0,06);	0,579 (10);
				1,07 (0,3)	1,21** (35)
	201	74 ч	э.з.	—	0,135 (2); 0,167(8)
	202	12,0 дней	э.з.	—	0,439(95); 0,522(0,1)
	203	—	29,50	—	—
	204	3,81 года	β ⁻ (97,9)	0,766	—
			э.з.(2,1)	—	—
	205	—	70,50	—	—
	206	4,19 мин	β ⁻	1,52	—
	207	4,79 мин	β ⁻	1,44	0,897 (0,16)
	207m	1,3 сек	и.п.	—	0,35; 1,00
	208	3,10 мин	β ⁻	1,80	0,583 (86); 2,614 (100)
	209	2,2 мин	β ⁻	1,99	0,45 (100); 1,56(100)
	210	1,32 мин	β ⁻	2,3	0,296(80); 0,795 (100)
⁸² Pb	194	11 мин	э.з.	—	0,204
	195	17 мин	э.з.	—	0,39*
	196	37 мин	э.з.	—	0,192; 0,240; 0,253; 0,367; 0,503
	197m	42 мин	э.з. (80)	—	0,085; 0,222;
			и.п. (20)	—	0,234; 0,386*
	198	2,4 ч	э.з.	—	0,173 (28); 0,290 (16);
				—	0,38** (40)
	198m	25 мин	э.з.	—	—
	199	90 мин	э.з.	—	0,353 (17);
			β ⁺	2,8	0,367 (80)
	199m	12,2 мин	и.п.	—	0,424 (20)
	200	21,5 ч	э.з.	—	0,109; 0,146*; 0,236; 0,26**; 0,290*;
				—	0,450
	201	9,4 ч	э.з.	—	0,330; 0,361;
			β ⁺	0,55	0,406; 0,585; 0,766; 0,907
	201m	61 сек	и.п.	—	0,629(51)
	202	~ 3·10 ⁵ лет	э.з.	—	—
	202m	3,62 ч	и.п. (90)	—	0,422 (90);
			э.з. (10)	—	0,658 (35); 0,787(45); 0,961 (90)
	203	52,1 ч	э.з.	—	0,279(81); 0,401 (5)
	203m	6,1 сек	и.п.	—	0,825 (70)
	204	—	1,40	—	—
	204m	66,9 мин	и.п.	—	0,375 (93); 0,90* (189)
	205	3,0·10 ⁷ лет	э.з.	—	—
	206	—	25,1	—	—
	207	—	21,7	—	—
	207m	0,80 сек	и.п.	—	0,570 (98); 1,064 (83)
	208	—	52,3	—	—
	209	3,30 ч	β ⁻	0,635	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁸² Pb	210	20,4 года	β ⁻ α (1,7·10 ⁻⁶)	0,061 3,72	0,047 (4)
	211	36,1 мин	β ⁻	1,36	0,405 (3,4); 0,427 (1,8); 0,832 (3,4)
	212	10,64 ч	β ⁻	0,58	0,239 (47); 0,300 (3,2)
	213	10,2 мин	β ⁻	—	—
	214	26,8 мин	β ⁻	1,03 (6); 0,67	0,242 (4); 0,295 (19); 0,352 (36)
⁸³ Bi	198 [2]	11,8 мин	э.з.	—	0,20; 0,32; 0,56; 1,06
	199	24,4 мин	э.з. (>99) α (~0,01)	— 5,53	—
	200	35 мин	э.з.	—	—
	201	1,85 ч	э.з.	—	—
	201m	52 мин	э.з. (>99) α (0,003)	— 5,28	—
	202	95 мин	э.з.	—	0,422; 0,961
	203	11,8 ч	э.з. β ⁺	— 1,35	0,82** (78); 1,52** (31); 1,87* (35)
	204	11,2 ч	э.з.	—	0,21**; 0,375; 0,671; 0,91**; 0,98; 1,21**
	205	15,31 дня	э.з. β ⁺ (0,06)	— 0,98	0,703 (28); 0,988 (17); 1,766 (27)
	206	6,243 дня	э.з. β ⁺ (8·10 ⁻⁴)	— —	0,516 (46); 0,538 (34); 0,803 (99); 0,880 (72)
	207	30,2 года	э.з.	—	0,570 (98); 1,063 (77)
	208	3,68·10 ⁵ лет	э.з.	—	2,614 (100)
	209	—	100	—	—
	210	5,013 дня	β ⁻ (>99) α (1,3·10 ⁻⁴)	1,160 4,69 (5·10 ⁻⁵); 4,65 (7·10 ⁻⁵)	—
	210m	~2,6·10 ⁶ лет	α (99,6)	4,96 (58); 4,92 (36); 4,57 (6)	0,262 (45); 0,30 (23); 0,34; 0,61
	211	2,13 мин	β ⁻ (0,4) α (>99)	— 6,62 (84); 6,28 (16)	0,351 (14)
	212	60,60 мин	β ⁻ (0,27) β ⁻ (64) α (36)	— 2,25 6,09 (10); 6,05 (25)	0,04 (2); 0,288 (0,5) 0,46** (0,8); 0,727 (7); 0,785 (1,1); 1,620 (1,8)
	213	47 мин	β ⁻ (97,8) α (2,2)	1,39 5,87	0,437
	214	19,9 мин	β ⁻ (>99) α (0,021)	3,26 5,51 (0,008); 5,45 (0,012)	0,609 (47); 0,769 (5); 0,935 (3); 1,120 (17); 1,238 (6); 1,378 (5)
	215	7 мин	β ⁻	—	1,40** (4); 1,509 (2); 1,728 (3); 1,764 (17); 1,848 (2); 2,117 (1); 2,204 (5); 2,445 (2)
⁸⁴ Po	194	0,5 сек	α	6,65	—
	195	3 сек	α	6,63	—
	195m	1,4 сек	α	6,72	—
	196	6 сек	α	6,53	—
	197	54 сек	α	6,30	—
	197m	25 сек	α	6,39	—
	198	1,7 мин	α (>34)	6,16	—
	199	5,0 мин	э.з. (97,3) α (2,7)	— 5,94	—
	199m	4,2 мин	э.з. (74) α (26)	— 6,05	—
	200	10,5 мин	э.з. (88) α (12)	— 5,86	—
	201	15,1 мин	э.з. (98,9) α (1,1)	— 5,68	—
	201m	8,9 мин	э.з. (97) α (3)	— 5,78	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁸⁴ Po	202	45 мин	э.з. (98) α (2)	— 5,58	—
	203	42 мин	э.з. (>99) α (0,02)	— 5,49	—
	204	3,6 ч	э.з. (>99) α (0,6)	— 5,38	—
	205	1,8 ч	э.з. (>99) α (0,07)	— 5,25	—
	206	8,8 дня	э.з. (95)	—	0,286/35/; 0,338/40/; 0,51**/100/; 0,807/60/; 1,02**/85/
	207	5,7 ч	α (5) э.з. (99) α (~0,01) β ⁺ (0,5)	5,22 (5) — 5,11 1,14	0,25/5/; 0,35/4/; 0,41/13/; 0,74/36/; 0,95/84/; 1,15/6/; 1,37/4/; 2,06/1,6/*** 0,26(42); 0,31(40); 0,82(100)
	207m	2,8 сек	и.п.	—	—
	208	2,93 года	α э.з. (~0,006)	5,11 —	0,285(0,003); 0,60** (0,006)
	209	103 года	α (>99) э.з. (~0,5)	4,88 (99) —	0,261** (0,4); 0,91 (0,5)
	210	138,40 дня	α	5,305 (100)	0,803 (0,0011)
	211	0,52 сек	α	7,45 (99)	0,570 (0,5); 0,90(0,5)
	211m	25 сек	α	8,88 (7); 7,28 (91)	0,570 (92); 1,063 (77)
	212	3,04·10 ⁻⁷ сек	α	8,78 (100)	—
	212m	45 сек	α	11,65 (97)	0,57 (2); 2,61 (2,6)
	213	4,2·10 ⁻⁶ сек	α	8,38	—
	214	1,64·10 ⁻⁴ сек	α	7,69 (100)	—
	215	1,778·10 ⁻⁸ сек	α (>99) β ⁻ (0,00023)	7,38 (100) —	—
	216	0,145 сек	α	6,78 (100)	—
	217	<10 сек	α	6,55	—
	218	3,05 мин	α (>99) β ⁻ (0,0185)	6,00 (100) —	—
⁸⁶ At	200	0,9 мин	α э.з.	6,47; 6,42	—
	201	1,5 мин	α э.з.	6,35	—
	202	3,0 мин	э.з. (88) α (12)	— 6,23 (4,3); 6,12(7,7)	—
	203	7,4 мин	э.з. (86) α (14)	— 6,09	—
	204	9,3 мин	э.з. (95,5) α (4,52)	— 5,95	—
	205	26,2 мин	э.з. (82) α (18)	— 5,90	—
	206	32,8 мин	α (~88) э.з. (~12)	5,70 (88) —	0,068(10)
	207	1,8 ч	э.з. (~90) α (~10)	— 5,76	—
	208	1,6 ч	э.з. (>99) α (0,5)	— 5,65	0,18(25); 0,66(100); 0,25
	209	5,5 ч	э.з. (~95) α (~5)	— 5,65 (5)	0,195 (23); 0,545 (62); 0,780 (94)
	210	8,3 ч	э.з. (>99) α (0,17)	— 5,52(0,05); 5,44(0,05); 5,36(0,06)	0,245 (79); 1,180 (100); 1,436 (29); 1,483 (48); 1,599 (14)
	211	7,21 ч	α (40,9) э.з. (59,1)	5,868 —	0,67
	212	0,30 сек	α	7,66 (80); 7,60 (20)	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв, (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁸⁵ At	212 m	0,12 сек	α	7,88(20); 7,82(80)	—
	214	~2·10 ⁻⁸ сек	α	8,78(99)	—
	215	~10 ⁻⁴ сек	α	8,01	—
	216	~3·10 ⁻⁴ сек	α	7,80(97)	—
	217	0,0323 сек	α	7,07(>99)	—
	218	~2 сек	α(>99)	6,70(94); 6,65(6)	—
	219	0,9 мин	β ⁻ (0,1) α(~97) β ⁻ (~3)	— 6,28 —	—
⁸⁶ Rn	201	3 сек	α	6,77	—
	202	13 сек	α	6,64	—
	203	45 сек	α	6,50	—
	203 m	28 сек	α	6,55	—
	204	75 сек	α	6,42	—
	205	1,8 мин	α	6,26	—
	206	6,5 мин	э.з. (35) α (65)	— 6,26	—
	207	10 мин	э.з. (96) α (4)	— 6,15	—
	208	23 мин	э.з. (80) α (20)	— 6,15	—
	209	30 мин	э.з. (83) α (17)	— 6,04	—
	210	2,42 ч	α (~96) э.з. (~4)	6,04 —	—
	211	15 ч	э.з. (74) α (26)	— 5,85 (9); 5,78 (17)	0,445 (29); 0,680 (74); 0,865 (18); 0,946 (21); 1,13 (23); 1,37 (38)
	212	25 мин	α	6,27	—
	215	~10 ⁻⁶ сек	α	8,6	—
	216	4,5·10 ⁻⁵ сек	α	8,05	—
	217	5,4·10 ⁻⁴ сек	α	7,74	—
	218	0,035 сек	α	7,14 (99,8)	0,609 (0,2)
	219	4,00 сек	α	6,82 (81); 6,55 (11); 6,42 (8)	0,272 (9); 0,401 (5)
	220	55,3 сек	α	6,29(100)	0,55 (0,07)
	221	25 мин	β ⁻ (~80) α (~20)	— 6,0	—
	222	3,8229 дня	α	5,49(100)	0,510 (0,07)
	223	43 мин	β ⁻ [2]	—	—
	224	1,9 ч	β ⁻ [2]	—	—
⁸⁷ Fr	204	2,0 сек	α	7,03	—
	205	3,7 сек	α	6,92	—
	206	15,8 сек	α	6,80	—
	207	19 сек	α	6,78	—
	208	37 сек	α	6,66	—
	209	55 сек	α	6,66	—
	210	2,6 мин	α	6,56	—
	211	3,1 мин	α	6,56	—
	212	19,3 мин	э.з. (56) α (44)	— 6,42 (16); 6,39 (17); 6,35 (11)	—
	213	34 сек	α (>99) э.з. (0,5)	6,78 —	—
	218	5·10 ⁻³ сек	α	7,85 (93)	—
	219	0,02 сек	α	7,31	—
	220	27,5 сек	α	6,68 (85); 6,64 (13)	—

Элемент	A	Период	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁸⁷ Fr	221	4,8 мин	α	6,34 (82); 6,12 (15)	0,218 (14)
	222	14,8 мин	β ⁻ (>99) α (0,01—0,1)	—	—
	223	22 мин	β ⁻	1,15	0,050 (40); 0,080 (13); 0,234 (4)
			α (~4·10 ⁻³)	5,34 [2]	
⁸⁸ Ra	213	2,7 мин	α	6,91	—
	219	~10 ⁻⁸ сек	α	8,0	—
	220	0,023 сек	α	7,46 (99)	0,465 (1)
	221	30 сек	α	6,76 (30); 6,67 (20); 6,61 (34); 6,59(8)	0,091 (3,5); 0,151 (13); 0,175 (2)
	222	38 сек	α	6,56 (96)	0,325 (4)
	223	11,435 дня	α	5,75 (9); 5,71 (54); 5,61 (26); 5,54 (9)	0,149** (10); 0,270 (10); 0,33** (6)
	224	3,64 дня	α	5,68 (94); 5,45 (6)	0,241 (3,7)
	225	14,8 дня	β ⁻	0,36	0,040 (33)
	226	1602 года	α	4,78 (95); 4,60 (6)	0,186 (4)
	227	41,2 мин	β ⁻	1,31	0,291 (4); 0,498 (0,6)
	228	6,7 года	β ⁻	0,05	—
	230	1 ч	β ⁻	1,2	—
⁸⁹ Ac	221	< 1 сек	α	7,63; 7,42 [2]	—
	222	5,5 сек	α	7,00 (93)	—
	223	2,2 мин	α (99)	6,66 (38); 6,65 (42); 6,57 (13)	0,082(0,2); 0,096 (0,2)
	224	2,9 ч	э.з. (1) э.з. (~90) α (~10)	— 6,20 (3); 6,14 (3); 6,04 (3)	0,132 (28); 0,217 (62)
	225	10,0 дней	α	5,73* (10); 5,83(54); 5,79 (28)	0,099; 0,150; 0,187
	226	29 ч	β ⁻ (~80) э.з. (~20)	1,2 —	0,158 (32); 0,185 (9); 0,230 (47); 0,253 (11)
	227	21,6 года	β ⁻ (99) α (1,4)	0,046 4,95* (1,2); 4,86*(0,18);	0,070; 0,166; 0,190
	228	6,13 ч	β ⁻	2,11	0,34** (15); 0,908 (25); 0,95** (20)
	229	66 мин	β ⁻	—	—
	230	< 1 мин	β ⁻	2,2	—
	231	15 мин	β ⁻	2,1	0,185; 0,28; 0,39; 0,71
⁹⁰ Th	223	0,9 сек	α	7,56	—
	224	1,05 сек	α	7,18 (79); 6,91 (19)	0,177 (9); 0,235 (0,4); 0,297 (0,3); 0,410 (0,8)
	225	8,0 мин	α (~90)	6,80 (8); 6,75 (6); 6,50 (12); 6,48 (39); 6,44 (13)	0,246 (5); 0,322 (27); 0,362 (5); 0,45 (1); 0,49 (1)
	226	30,9 мин	э.з. (~10) α	— 6,34 (79); 6,22 (19)	0,111 (3,4); 0,242 (1,2)
	227	18,2 дня	α	6,04 (23); 5,98 (24); 5,76 (21); 5,72* (14)	0,050 (8); 0,237** (15); 0,31** (8)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁹⁰ Th	228	1,910 года	α	5,43 (71); 5,34 (28)	0,084 (1,6); 0,132 (0,2); 0,167 (0,1); 0,214 (0,3)
	229	7340 лет	α	5,05 (7); 4,97**(10); 4,90 (11); 4,84 (58); 4,81 (11)	0,137**(~3); 0,20*(~10)
	230	8,0·10 ⁴ лет	α	4,68 (76); 4,62 (24)	0,068 (0,6); 0,142 (0,07)
	231	25,52 ч	β ⁻	0,30	0,026 (2); 0,084**(10)
	232	1,41·10 ¹⁰ лет	100 α	—	—
	233	22,12 мин	β ⁻	4,01 (76); 3,95 (24)	0,029 (2,1); 0,087 (2,7); 0,171 (0,7); 0,453 (1)
	234	24,10 дня	β ⁻	0,191	0,063*(3,5); 0,093*(4)
⁹¹ Pa	225	2,0 сек	α	7,25 [2]	—
	226	1,8 мин	α (74) э.з. (26)	6,86 (38); 6,82(34) —	—
	227	38,3 мин	α (~85)	6,47 (43); 6,42** (23); 6,40 (8); 6,36 (7)	0,065** (6); 0,110 (2)
	228	22 ч	э.з. (~15) э.з. (~98) α (~2)	— — 6,11** (1); 6,08 (0,4); 6,03 (0,2); 5,80 (0,2)	0,14 (3); 0,20 (9); 0,28 (5); 0,33 (18); 0,41 (13); 0,46 (32); 0,95 (93); 1,57 (7); 1,85 (4)***
	229	1,5 дня	э.з. (>99) α (0,25)	— 5,67(0,05); 5,62**(0,07); 5,58(0,10); 5,54 (0,03)	—
	230	17,7 дня	э.з. (89,6) β ⁻ (10,4) α (0,0032)	— 0,41 5,34; 5,32; 5,30 [2]	0,45** (18); 0,91** (24); 0,95 (50)
	231	3,25·10 ⁴ лет	α	5,06 (10); 5,02 (23); 5,01 (24); 4,95 (22); 4,73 (11)	0,027 (6); 0,29** (6)
	232	1,31 дня	β ⁻	1,3 (0,7); 0,32	0,150 (12); 0,87**(51); 0,97 (40)
	233	27,0 дней	β ⁻	0,568 (5); 0,257	0,31** (44)
	234	6,75 ч	β ⁻	1,3 (<2); 1,13 (13); 0,53	0,100 (50); 0,126 (26); 0,70 (24); 0,90 (70)***
	234m	1,175 мин	β ⁻ (>99) и. п. (0,13)	2,29	0,765 (0,30); 1,001 (0,60)
	235	23,7 мин	β ⁻	—	—
	236	12 мин	β ⁻	1,4	—
	237	39 мин	β ⁻	3,3	—
				2,3	0,090/50/; 0,145/45/; 0,205/55/; 0,330/40/; 0,46/100/; 0,75/50/; 0,87/100/; 0,92/100/
⁹² U	227	1,3 мин	α	6,8	—
	228	9,1 мин	α (<95) э.з. (<5) э.з. (~80) α (~20)	6,69/70/; 6,60/29/ — — 6,36 (13); 6,33 (4); 6,30 (3)	0,152 (0,2); 0,187 (0,3); 0,246 (0,4)
	229	58 мин	α (~20)	5,89 (67); 5,82 (32)	—
	230	20,8 дня	α	—	0,072 (0,54); 0,231 (0,18)
	231	4,3 дня	э.з. (>99) α (0,0055)	— 5,46	0,084 (7); 0,218 (1)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁹² U	232	72 года	α	5,32 (68); 5,27 (32)	0,058 (0,21); 0,129 (0,082)
	233	1,62·10 ⁵ лет	α	4,82 (83); 4,78 (15)	0,029 /60/; 0,042 /310/; 0,055 /68/; 0,097 /100/; 0,164 /27/; 0,32* /43/
	234	2,47·10 ⁵ лет	α	4,77 (72); 4,72 (28)	0,053 (0,2)
	235	7,1·10 ⁸ лет	α	4,58* (8); 4,40 (57); 4,37 (18)	0,143 (11); 0,185 (54); 0,204 (5)
	235m	26,1 мин	и. п.	—	—
	236	2,39·10 ⁷ лет	α	4,49 (76); 4,44 (24)	—
	237	6,75 дня	β ⁻	0,248	0,026 (2); 0,060 (36); 0,165 (2); 0,208 (23)
	238	4,51·10 ⁹ лет	99,276 α	—	—
	239	23,54 мин	β ⁻	4,20 (75); 4,15 (25) 1,29	0,044 (4); 0,075 (51)
	240	14,1 ч	β ⁻	0,36	—
⁹³ Np	231	~50 мин	α	6,29	—
	232	~13 мин	э. з.	—	—
	233	35 мин	э. з. (>99) α (~10 ⁻³)	— 5,54	—
	234	4,40 дня	э. з. β ⁺ (~0,05)	— 0,8	0,109; 0,23; 0,25; 0,45; 0,50; 0,75; 0,95; 1,21; 1,56***
	235	410 дней	э. з. (>99) α (1,6·10 ⁻³)	— 5,02	—
	236	22 ч	э. з. (51) β ⁻ (49)	— 0,52	0,642; 0,688;
	237	2,14·10 ⁶ лет	α	4,78** (75); 4,65* (12)	0,030 (14); 0,086 (14); 0,145 (1)
	238	2,10 дня	β ⁻	1,25	1,01** (42)
	239	2,346 дня	β ⁻	0,713 (11); 0,437	0,106 (23); 0,209 (4); 0,228 (12); 0,278 (14)
	240	63 мин	β ⁻	0,89	0,16; 0,25; 0,44; 0,56; 0,60; 0,92; 1,00; 1,16
	240m	7,3 мин	β ⁻	2,16	0,56 (21); 0,60 (13); 0,92** (3); 1,5** (3)
	241	16 мин	β ⁻	1,3	0,14; 0,18 [2]
⁹⁴ Pu	232	36 мин	α (>2) э. з. (<98)	6,59 —	—
	233	20 мин	э. з. (>99) α (0,1)	— 6,31	—
	234	9 ч	э. з. (94) α (6)	— 6,20 (4); 6,15 (1,9)	—
	235	26 мин	э. з. (>99) α (0,003)	— 5,86	—
	236	2,85 года	α	5,77 (69); 5,72 (31)	0,048 (0,31); 0,109 (0,012)
	237	45,6 дня	э. з. (>99) α (0,0033)	— 5,66 /21/; 5,37 /79/	0,060 (5)
	237m	0,18 сек	и. п.	—	0,145 (2)
	238	86,4 года	α	5,50 (72); 5,46 (28)	0,099 (8·10 ⁻³); 0,150 (1·10 ⁻³)
	239	24390 лет	α	5,16* (88); 5,11 (11)	0,039 (0,007); 0,052 (0,020); 0,129 (0,005); 0,375 (0,0012); 0,414 (0,0012)
	240	6580 лет	α	5,17 (76); 5,12 (24)	0,65** (2·10 ⁻⁵)
	241	13,2 года	β ⁻ (>99) α (2,3·10 ⁻³)	0,021 4,90 (0,0019) 4,85 (0,0003)	0,145 (1,6·10 ⁻⁴)
	242	3,79·10 ⁵ лет	α	4,90 (76); 4,86 (24)	—
	243	4,98 ч	β ⁻	0,58	0,084 (21); 0,381 (0,7)
	244	~7,6·10 ⁷ лет	α	4,58; 4,54 [2]	—
	245 [2]	10,48 ч	β ⁻	0,9; 1,2	0,33; 0,56
	246	10,85 дня	β ⁻	0,33 (10); 0,15	0,044 (30); 0,180 (10); 0,224 (25)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
²⁴¹ Am	237	~1,3 ч	э.з. (>99) α (0,005)	— 6,02	—
	238	1,9 ч	э.з.	—	0,36 (12); 0,58 (29); 0,98* (80); 1,35 (76)
	239	12,1 ч	э.з. (>99) α (0,005)	— 5,78	0,209 (5); 0,228* (18); 0,278 (17)
	240	51,0 ч	э.з.	—	0,90 (23); 1,00 (77)
	241	458 лет	α	5,49 (85); 5,44 (13)	0,060 (36); 0,101** (0,04)
	242	16,01 ч	β ⁻ (84)	0,67	—
	242m	152 года	э.з. (16) н.п. (>99) α (0,48)	— — 5,21 (0,41)	0,049 (0,20); 0,087 (0,036)
	243	7,95·10 ⁸ лет	α	5,28 (87); 5,23 (11,5)	0,044 (4); 0,075 (50)
	244	10,1 ч	β ⁻	0,387	0,099 (5); 0,154 (19); 0,746 (66); 0,900 (25)
	244m ₁	26 мин	β ⁻ (>99) э.з. (0,039)	1,50 —	—
²⁴² Cm	238	2,5 ч	э.з. (<90) α (>10)	— 6,51	—
	239	2,9 ч	э.з.	—	0,188
	240	26,8 дня	α	6,29 (72); 6,25 (28)	—
	241	7,9·10 ⁵ лет	с.д.	—	0,475 (95); 0,60
	241	35 дней	э.з. (99) α (1,0)	— 5,94	—
	242	162,5 дня	α	6,12 (74); 6,07 (26)	0,044 (0,041); 0,102 (4·10 ⁻³);
	243	7,2·10 ⁶ лет	с.д.	—	0,158 (2,5·10 ⁻³)
	243	32 года	α	6,06* (6); 5,99* (6); 5,79 (73); 5,74 (11,5)	0,209 (4); 0,228 (12); 0,278 (14)
	244	17,6 лет	э.з. (0,3) α	— 5,81 (77); 5,77 (23)	0,043 (0,02); 0,100 (0,0015); 0,150 (0,0013)
	245	1,31·10 ⁷ лет	с.д.	—	—
	246	9,3·10 ⁸ лет	α	5,36 (80); 5,31 (7)	0,13 (5); 0,173 (14)
	246	5,5·10 ⁸ лет	α	5,39 (81); 5,34 (19)	—
	247	1,7·10 ⁷ лет	с.д.	—	—
	248	1,64·10 ⁷ лет	α [2]	—	—
²⁴³ Bk	243	4,6 ч	э.з. (>99) α (0,15)	— 6,76 (0,023); 6,72 (0,019); 6,57 (0,038); 6,54 (0,029); 6,21 (0,020)	0,755; 0,84; 0,946
	244	4,4 ч	э.з. (>99) α (0,006)	— 6,62 (0,003); 6,67 (0,003)	0,218 (100); 0,892 (88)
	245	4,98 дня	э.з. (>99) α (0,11)	— 6,36 (0,018); 6,32 (0,017); 6,15 (0,021); 6,12 (0,016); 5,89 (0,024)	0,253 (31); 0,39* (3)
	246	1,8 дня	э.з.	—	0,800 (40); 1,07** (12)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов. %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
⁹⁷ Bk	247	1,4·10 ⁸ лет	α	5,68 (37); 5,52 (58)	0,084 (40); 0,27 (30)
	248	16 ч	β ⁻ (70) э.з. (30)	0,65	—
	249	314 дней	β ⁻ (>99) α (0,0022)	0,125 5,42 (0,0015)	0,32* (3·10 ⁻⁵)
	250	6·10 ⁸ лет 193,3 мин	с.д. β ⁻	— 1,76 (11); 0,73	0,990 (47); 1,032 (39)
⁹⁸ Cf	244	25 мин	α	7,18	—
	245	44 мин	э.з. (70) α (30)	— 7,12	—
	246	35,7 ч 2,1·10 ³ лет	α с.д.	6,76 (78); 6,72 (22)	—
	247	2,5 ч	э.з.	—	0,295 (1); 0,417; 0,460
	248	350 дней ≥1,5·10 ⁴ лет	α с.д.	6,27 (82); 6,22 (18)	—
	249	360 лет 1,5·10 ⁹ лет	α с.д.	5,81 (84)	0,333 (16); 0,388 (72)
	250	13,2 года 1,7·10 ⁴ лет	α с.д.	6,03 (83); 5,99 (17)	—
	251	~800 лет	α	5,85 (45); 5,67 (55)	0,18
	252	2,646 года 85 лет	α (96,9) с.д. (3,1)	6,12 (82); 6,08 (15)	—
	253	17,6 дня	β ⁻ (>99) α (0,31)	0,27 5,98	—
	254	60,5 дня	с.д. (>99) α (~0,2)	— 5,84	—
⁹⁹ Es	245	1,3 мин	α (17) э.з. (83)	7,70	—
	246	7,3 мин	α (10) э.з. (90)	7,33	—
	247	5,0 мин	α (~7) э.з. (~93)	7,33	—
	248	25 мин	э.з. (>99) α (~0,3)	— 6,88	—
	249	2 ч	э.з. (>99) α (0,13)	— 6,77	—
	250	8 ч	э.з.	—	—
	251	1,5 дня	э.з. (>99) α (0,53)	— 6,49	—
	252	~140 дней	α	6,64 (82); 6,58 (13)	0,228 (0,23); 0,278 (0,21); 0,40** (1,1) 0,387** (0,05)
	253	20,47 дней 6,4·10 ⁵ лет	α с.д.	6,64 (90)	—
	254	276 дней 7·10 ⁵ лет	α с.д.	6,44 (93)	0,063 (2); 0,27** (0,12); 0,31* (0,22)
	254m	39,3 ч	β ⁻ (>99) э.з. (0,08)	1,13 (25); 0,43	0,65 (31); 0,69** (38)
	255	>10 лет 38,3 дня >170 лет	с.д. β ⁻ (91,5) α (8,5) с.д.	— — 6,31 —	—
¹⁰⁰ Fm	245 [2]	4,2 сек	α	8,15	—
	246 [2]	1,2 сек	α с.д.	8,24	—
	247 [2]	9,2 сек	α	8,18	—
	247 [2]	35 сек	α	7,87; 7,93	—
	248 [2]	38 сек	α с.д.	7,87; 7,83	—
	249 [2]	2,6 мин	α э.з.	7,53	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов. %	Энергия, Мэв (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
¹⁰⁰ Fm	250	30 мин	α	7,42	—
	251	7 ч	э.з. (~99) α (~1)	— 6,83 [2]	0,41 [2]
	252	22,7 ч >8 лет	α с.д.	7,05 —	—
	253	3,0 дня	э.з. (89) α (11)	— 6,96 (9); 6,91 (2)	0,27 [2]
	254	3,24 ч 246 дней	α (>99) с.д. (0,055)	7,20 (82); 7,16 (17) —	—
	255	20,1 ч 1,10 ⁴ лет	α с.д.	7,03 (93) —	0,059* (0,9); 0,081* (1,1)
	256	2,7 ч	с.д. (97) α (3)	— 6,86	—
	257	80 дней 100 лет	α с.д.	6,53 (94) —	0,180 (8); 0,242 (10)
¹⁰¹ Md	252 [2]	~8 мин	э.з.	—	—
	255	0,6 ч	э.з. (90) α (10)	— 7,34	—
	256	1,5 ч	э.з. (97) α (3)	— 7,18	—
	257 [2]	4,8 ч	э.з. (~92) α (~8)	— 7,08	—
	258 [2]	54 дня	α	6,73; 6,78	—
¹⁰² (No)* ¹	251	0,8 сек	α	8,68? (20); 8,58 (80)	—
	252	2,1 сек	α (~70) с.д. (~30)	8,41 —	—
	253	100 сек	α	8,02	—
	254	55 сек	α	8,10	—
	255	180 сек	α	8,11	—
	256	2,7 сек	α	8,43	—
	257	20 сек	с.д. (0,5) α	— 8,27 (50); 8,23? (50)	—
¹⁰³ (Lr)* ¹	256 [2]	35 сек	α	8,35—8,60	—
	257? [2]	35 сек	α	8,50—8,60	—
	258 } 259 } [2]	8 сек	α	~8,6	—
¹⁰⁴ Ku	260	0,3 сек	с.д.	—	—

*¹ Названия не являются общепринятыми.

Таблица 37.2

Эталонные энергии γ -квантов в диапазоне энергий E_γ от ~ 12 до 3450 кэв [1]

Нуклид	Период полураспада	E_γ , кэв
²⁴¹ Am	458 лет	11,887 $\pm$ 0,004
²⁴¹ Am	458 лет	13,9 $\pm$ 0,1
⁵⁷ Co	270 дней	14,36 $\pm$ 0,05
²⁴¹ Am	458 лет	17,8 $\pm$ 0,1
²⁴¹ Am	458 лет	20,8 $\pm$ 0,1
¹⁰⁹ Gd	453 дня	22,1 $\pm$ 0,1
¹⁰⁹ Gd	453 дня	25,0 $\pm$ 0,1
²⁴¹ Am	458 лет	26,348 $\pm$ 0,010
¹³⁷ Cs	30,0 лет	32,1 $\pm$ 0,1
¹³⁷ Cs	30,0 лет	36,5 $\pm$ 0,1
²⁴¹ Am	458 лет	59,543 $\pm$ 0,015
²⁰³ Hg	46,9 дней	70,833 $\pm$ 0,001
²⁰³ Hg	46,9 дней	72,873 $\pm$ 0,001
¹³¹ I	8,05 дней	80,164 $\pm$ 0,008
²⁰³ Hg	46,9 дней	82,5 $\pm$ 0,2
²⁰³ Hg	46,9 дней	84,9 $\pm$ 0,1
¹⁰⁹ Gd	453 дня	87,7 $\pm$ 0,2
¹⁸² Ta	115 дней	100,104 $\pm$ 0,002
^{177m} Lu	155 дней	105,36 $\pm$ 0,02
^{177m} Lu	155 дней	112,97 $\pm$ 0,02
^{177m} Lu	155 дней	121,56 $\pm$ 0,03
⁵⁷ Co	270 дней	121,97 $\pm$ 0,05
^{177m} Lu	155 дней	128,48 $\pm$ 0,02
⁵⁷ Co	270 дней	136,33 $\pm$ 0,04
¹³¹ Ce	33 дня	145,43 $\pm$ 0,02
¹⁸² Ta	115 дней	152,435 $\pm$ 0,003
^{177m} Lu	155 дней	153,25 $\pm$ 0,04
¹⁸² Ta	115 дней	156,387 $\pm$ 0,003
¹³⁹ Ce	140 дней	165,84 $\pm$ 0,03
¹⁸² Ta	115 дней	179,393 $\pm$ 0,004
^{177m} Lu	155 дней	204,08 $\pm$ 0,06
¹⁹² Ir	74,2 дня	205,782 $\pm$ 0,014
^{177m} Lu	155 дней	208,34 $\pm$ 0,06
¹⁸² Ta	115 дней	222,109 $\pm$ 0,005
^{177m} Lu	155 дней	228,44 $\pm$ 0,06
¹⁸² Ta	115 дней	229,322 $\pm$ 0,008
²¹² Pb	10,6 час	238,61 $\pm$ 0,01
²¹⁴ Pb	26,8 мин	241,924 $\pm$ 0,030
¹⁸² Ta	115 дней	264,072 $\pm$ 0,009
²⁰³ Hg	46,9 дня	279,17 $\pm$ 0,02
^{177m} Lu	155 дней	281,78 $\pm$ 0,07
¹³¹ I	8,05 дня	284,311 $\pm$ 0,010
²¹⁴ Pb	26,8 мин	295,217 $\pm$ 0,039
¹⁹² Ir	74,2 дня	295,938 $\pm$ 0,009
¹⁹² Ir	74,2 дня	308,429 $\pm$ 0,010
¹⁹² Ir	74,2 дня	316,486 $\pm$ 0,010
⁵¹ Cr	27,8 дня	320,08 $\pm$ 0,05
²¹⁴ Pb	26,8 мин	351,992 $\pm$ 0,062
¹³¹ I	8,05 дня	364,491 $\pm$ 0,015
¹⁹⁸ Au	2,698 дня	411,795 $\pm$ 0,009
¹⁹² Ir	74,2 дня	468,053 $\pm$ 0,014
⁷ Be	53 дня	477,57 $\pm$ 0,05
^{m₀C²}	*	511,006 $\pm$ 0,002
²⁰⁷ Bi	30 лет	569,63 $\pm$ 0,08
²⁰⁸ Tl	3,1 мин	583,139 $\pm$ 0,023
¹⁹² Ir	74,2 дня	588,557 $\pm$ 0,017

Нуклид	Период полураспада	E_γ , кэв
¹⁹² Ir	74,2 дня	604,385 $\pm$ 0,017
²¹⁴ Bi	19,8 мин	609,37 $\pm$ 0,16
¹⁹² Ir	74,2 дня	612,435 $\pm$ 0,017
¹³¹ I	8,05 дня	636,90 $\pm$ 0,23
^{110m} Ag	253 дня	657,61 $\pm$ 0,16
¹³⁷ Cs	30,0 лет	661,595 $\pm$ 0,076
^{110m} Ag	253 дня	677,36 $\pm$ 0,20
^{110m} Ag	253 дня	686,80 $\pm$ 0,25
^{110m} Ag	253 дня	706,28 $\pm$ 0,25
¹³¹ I	8,05 дня	722,91 $\pm$ 0,05
^{110m} Ag	253 дня	743,99 $\pm$ 0,25
^{110m} Ag	253 дня	763,77 $\pm$ 0,20
⁵⁸ Co	71,3 дня	810,46 $\pm$ 0,10
^{110m} Ag	253 дня	817,87 $\pm$ 0,30
⁵⁴ Mn	303 дня	834,85 $\pm$ 0,10
⁵⁶ Co	77 дней	846,77 $\pm$ 0,06
^{110m} Ag	253 дня	884,46 $\pm$ 0,25
⁴⁶ Sc	83,9 дня	889,18 $\pm$ 0,10
⁸⁸ Y	108 дней	897,96 $\pm$ 0,10
^{110m} Ag	253 дня	937,2 $\pm$ 0,3
²⁰⁷ Bi	30 лет	1063,58 $\pm$ 0,06
⁶⁵ Zn	245 дней	1115,44 $\pm$ 0,01
⁴⁸ Sc	83,9 дня	1120,41 $\pm$ 0,10
²¹⁴ Bi	19,8 мин	1120,42 $\pm$ 0,46
¹⁸² Ta	115 дней	1121,28 $\pm$ 0,12
⁶⁰ Co	5,26 года	1173,226 $\pm$ 0,040
¹⁸² Ta	115 дней	1189,03 $\pm$ 0,20
¹⁸² Ta	115 дней	1221,42 $\pm$ 0,10
⁵⁶ Co	77 дней	1238,55 $\pm$ 0,11
²² Na	2,60 года	1274,53 $\pm$ 0,10
⁶⁰ Co	5,26 года	1332,483 $\pm$ 0,046
²⁴ Na	15,0 час	1368,526 $\pm$ 0,044
^{110m} Ag	253 дня	1475,5 $\pm$ 0,4
^{110m} Ag	253 дня	1504,6 $\pm$ 0,5
^{110m} Ag	253 дня	1561,8 $\pm$ 0,4
⁵⁸ Co	71,3 дня	1674,9 $\pm$ 0,3
²¹⁴ Bi	19,8 мин	1764,45 $\pm$ 0,22
²⁰⁷ Bi	30 лет	1769,71 $\pm$ 0,13
⁵⁶ Co	77 дней	1771,64 $\pm$ 0,46
⁸⁸ Y	108 дней	1836,08 $\pm$ 0,07
⁵⁶ Co	77 дней	2035,13 $\pm$ 0,26
²¹⁴ Bi	19,8 мин	2204,25 $\pm$ 0,4
⁵⁶ Co	77 дней	2598,75 $\pm$ 0,35
²⁰⁸ Tl	3,1 мин	2614,47 $\pm$ 0,10
²⁴ Na	15,0 час	2753,92 $\pm$ 0,12
⁵⁶ Co	77 дней	3202,80 $\pm$ 0,50
⁵⁶ Co	77 дней	3254,00 $\pm$ 0,35
⁵⁶ Co	77 дней	3273,6 $\pm$ 0,4
⁵⁶ Co	77 дней	3452,6 $\pm$ 0,5

* Аннигиляционное излучение, сопровождающее позитронный распад нуклидов.

37.3. ЭТАЛОННЫЕ ГРУППЫ α -ЧАСТИЦ

Таблица 37.3

Эталонные группы α -частиц в диапазоне энергий от 2,5 до 7 Мэв [1]

Нукл ид	Период полураспада	Энергия интенсивных α -групп, Мэв	Относительная интенсивность, %
¹⁴⁶ Sm	7·10 ⁷ лет	2,46±0,02	100
¹⁴⁸ Gd	84 года	3,18±0,01	100
¹⁵⁰ Gd	2,1·10 ⁶ лет	2,73±0,01	100
²³² Th	1,41·10 ¹⁰ лет	4,011±0,005	77
²³⁸ U	4,5·10 ⁹ лет	4,200±0,005	77
²³⁵ U[5]	7,1·10 ⁸ лет	4,550±0,003	3
		4,438±0,003	3
		4,394±0,002	62
		4,214±0,003	5,5
²³⁶ U	2,39·10 ⁷ лет	4,493±0,003	74
²³⁰ Th	8,0·10 ⁴ лет	4,6840±0,0015	76
		4,6175±0,0015	24
²³⁴ U	2,4·10 ⁵ лет	4,7736±0,0020	72
²³⁷ Np[3]	2,14·10 ⁶ лет	4,787±0,002	51
²³³ U[3]	1,62·10 ⁵ лет	4,8236±0,0012	84
		4,7829±0,0012	13
²⁴¹ Pu[3]	5,6·10 ⁵ лет	4,896±0,0015	83
		4,853±0,0015	12
²⁴² Pu[3]	3,73·10 ⁵ лет	4,900±0,002	74
		4,856±0,002	26
²³¹ Pa[3]	3,25·10 ⁴ лет	5,057±0,001	11
		5,013±0,001	25
		4,950±0,001	23
²³⁹ Pu[3]	2,44·10 ⁴ лет	5,1556±0,0008	73
		5,1433±0,0008	15
		5,1055±0,0008	11
²⁴⁰ Pu[3]	6,58·10 ³ лет	5,1677±0,0007	76
		5,1233±0,0007	24
²⁴³ Am[3]	7,95·10 ³ лет	5,275±0,001	88
		5,233±0,001	11
²⁴¹ Am[3]	458 лет	5,484±0,001	86
		5,442±0,001	13
²³⁸ [Pu] [3]	86,4 года	5,499±0,001	72
		5,455±0,001	28
²⁴³ Cm[4]	32 года	5,785±0,001	73
		5,742±0,001	11
²⁴⁴ Cm[4]	17,6 года	5,805±0,001	77
		5,763±0,001	23
²⁵⁰ Cf[4]	13,2 года	6,0308±0,0006	85
		5,9891±0,0006	15
²⁴² Cm[4]	162,5 дня	6,1129±0,0003	74
		6,0695±0,0005	26
²⁵² Cf[4]	2,646 года	6,1183±0,0005	84
		6,0757±0,0005	16
²⁴⁹ Cf[4]	360 лет	6,1940±0,0007	2
		5,813±0,001	84
		5,760±0,001	4
²⁵³ Es[4]	20,47 дня	6,631±0,002	91
²⁵⁵ Fm[4]	20,1 часа	7,016±0,002	93

37.4. КВАНТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯДЕР

В табл. 37.4 приведены экспериментально определенные значения спинов I , магнитных моментов μ и электрических квадрупольных моментов Q основных и некоторых долгоживущих метастабильных (помечены символом m) состояний [6] для четно-нечетных, нечетно-четных и нечетно-нечетных ядер. В таблицу не включены четно-четные ядра, у которых значения спинов и магнитных моментов основных состояний равны нулю. Значения I , μ и Q даны в единицах $\hbar/2\pi$ (где $\hbar$ — пос-

тоянная Планка), в ядерных магнетонах и барнах соответственно. Значения спинов в круглых скобках получены косвенно.

Таблица 37.4

Спины, магнитные моменты и электрические квадрупольные моменты ядер

Элемент	A	$I, \hbar/2\pi$	μ	$Q, \text{барн}$
⁰ n	1	1/2	—1,9131	—
¹ H	1 2 3	1/2 1 1/2	+2,79278 +0,85742 +2,9789	— +0,0028 —
² He	3	1/2	—2,1276	—
³ Li	6 7 8	1 3/2 (2)	+0,82202 +3,2564 +1,6532	—0,0008 —0,04 —
⁴ Be	9	3/2	—1,1776	+0,05
⁵ B	10 11 12	3 3/2 (1)	+1,8007 +2,6885 +1,002	+0,08 +0,04 —
⁶ C	11 13	3/2 1/2	±1,03 +0,7024	±0,031 —
⁷ N	12 13 14 15	(1) 1/2 1 1/2	±0,46 ±0,3221 +0,4036 —0,2831	— — +0,01 —
⁸ O	15 17	1/2 5/2	±0,7189 —1,8937	— —0,026
⁹ F	17 19 20	(5/2) 1/2 (2)	±4,722 +2,6288 +2,094	— — —
¹⁰ Ne	19 21 23	1/2 3/2 (5/2)	—1,887 —0,6618 —1,08	— +0,09 —
¹¹ Na	21 22 23 24	3/2 3 3/2 4	+2,386 +1,746 +2,2175 +1,690	— — +0,14 —
¹² Mg	25	5/2	—0,8551	+0,22
¹³ Al	27	5/2	±3,6414	+0,15
¹⁴ Si	29	1/2	—0,5553	—

Продолжение табл. 37.4

Элемент	A	I, h/2π	μ	Q, барн
¹⁵ P	30	1	—	—
	31	1/2	+1,1317	—
	32	1	-0,2523	—
¹⁶ S	33	3/2	+0,6433	-0,055
	35	3/2	±1,00	+0,04
¹⁷ Cl	35	3/2	+0,82183	- 0,079
	36	2	+1,285	- 0,017
	37	3/2	+0,68411	- 0,062
¹⁸ Ar	35	(3/2)	+0,63	—
	37	3/2	+0,95	—
	39	7/2	-1,3	—
¹⁹ K	37	3/2	+0,204	—
	38	3	+1,374	—
	39	3/2	+0,3914	+0,055
	40	4	-1,298	-0,07
	41	3/2	+0,2149	+0,067
	42	2	-1,141	—
	43	3/2	±0,163	—
	45	3/2	±0,173	—
²⁰ Ca	41	7/2	-1,595	—
	43	7/2	-1,317	—
²¹ Sc	43	7/2	+4,62	-0,26
	44	2	+2,56	+0,10
	44m	6	+3,88	-0,19
	45	7/2	+4,7564	-0,22
	46	4	+3,03	+0,12
	47	7/2	+5,34	-0,22
	48	6	—	—
²² Ti	45	7/2	±0,095	~ ±0,02
	47	5/2	-0,7883	+0,29
	49	7/2	-1,1039	+0,24
²³ V	47	3/2	—	—
	48	4	—	—
	49	7/2	±4,5	—
	50	6	+3,3470	±0,06
	51	7/2	+5,149	-0,05
²⁴ Cr	49	5/2	±0,48	—
	51	7/2	±0,94	—
	53	3/2	-0,4744	±0,03
²⁵ Mn	51	5/2	±3,57	—
	52	6	±3,05	—
	52m	2	±0,0076	—
	53	7/2	±5,01	—
	54	3	±3,28	—
	55	5/2	+3,444	+0,4
	56	3	+3,218	—

Продолжение табл. 37.4

Элемент	A	I, h/2π	μ	Q, барн
²⁶ Fe	57	1/2	+0,0902	—
	57m	(3/2)	-0,1547	+0,2
	59	3/2	—	—
²⁷ Co	56	4	±3,83	—
	57	7/2	±4,62	—
	58	2	+4,03	—
	59	7/2	+4,62	+0,4
	60	5	+3,78	—
	60m	2	—	—
²⁸ Ni	61	3/2	-0,7487	+0,16
	61m	(5/2)	+0,42	—
²⁹ Cu	60	2	+1,22	—
	61	3/2	+2,13	—
	62	1	-0,38	—
	63	3/2	+2,223	-0,180
	64	1	-0,216	—
	65	3/2	+2,382	-0,195
	66	1	±0,283	—
³⁰ Zn	63	3/2	-0,282	+0,31
	65	5/2	+0,769	-0,026
	67	5/2	+0,8754	+0,17
³¹ Ga	66	0	—	—
	67	3/2	+1,850	+0,22
	68	1	±0,0117	±0,031
	69	3/2	+2,016	+0,19
	70	1	—	—
	71	3/2	+2,562	+0,12
	72	3	-0,1322	+0,59
³² Ge	71	1/2	+0,546	—
	73	9/2	-0,8792	-0,28
	75	1/2	±0,51	—
³³ As	70	4	—	—
	72	2	—	—
	75	3/2	+1,439	+0,29
	76	2	-0,905	—
³⁴ Se	75	5/2	—	+1,0
	77	1/2	+0,534	—
	79	7/2	-1,02	+0,8
³⁵ Br	76	1	±0,548	±0,25
	77	3/2	—	—
	79	3/2	+2,106	+0,31
	80	1	±0,514	±0,18
	80m	5	+1,317	+0,71
	81	3/2	+2,270	+0,26
	82	5	±1,626	±0,70

Продолжение табл. 37.4

Эле- мент	A	I, h/2π	μ	Q, барн
⁸⁶ Kr	83	9/2	-0,970	+0,26
	83m	(7/2)	—	+0,44
	85	9/2	±1,005	+0,43
⁸⁷ Rb	81	3/2	+2,05	—
	81m	9/2	—	—
	82m	5	+1,643	—
	83	5/2	+1,4	—
	84	2	-1,32	—
	85	5/2	+1,3524	+0,26
	86	2	-1,691	—
	87	3/2	+2,7500	+0,12
88	2	—	±0,51	—
⁸⁸ Sr	87	9/2	-1,093	+0,3
⁸⁹ Y	89	1/2	-0,1373	—
	90	2	-1,63	-0,15
	91	1/2	±0,164	—
⁹⁰ Zr	91	5/2	-1,303	—
⁹¹ Nb	93	9/2	+6,167	-0,22
⁹² Mo	95	5/2	-0,9133	±0,12
	97	5/2	-0,9325	±1,1
⁹³ Tc	99	9/2	+5,68	+0,3
⁹⁴ Ru	99	5/2	-0,63	—
	99m	3/2	-0,29	~0,1
	101	5/2	-0,69	—
⁹⁵ Rh	103	1/2	-0,0883	—
⁹⁶ Pd	105	5/2	-0,642	+0,8
⁹⁷ Ag	102	5	—	—
	102m	2	+4	—
	103	7/2	+4,4	—
	104	5	+4,0	—
	104m	2	+3,7	—
	105	1/2	±0,101	—
	106	1	+2,9	—
	106m	6	—	—
	107	1/2	-0,1135	—
	108	1	+2,80	—
	109	1/2	-0,1305	—
	109m	7/2	±4,3	—
	110	1	+2,85	—
	110m	6	+3,604	—
	111	1/2	-0,145	—
	112	2	±0,054	—
	113	1/2	±0,159	—

Продолжение табл. 37.4

Эле- мент	A	I, h/2π	μ	Q, барн
¹⁰⁸ Cd	105	5/2	-0,74	+0,5
	107	5/2	-0,6144	+0,8
	109	5/2	-0,8270	+0,8
	111	1/2	-0,5943	—
	111m	11/2	-1,11	-1,0
	113	1/2	-0,6217	—
	113m	11/2	-1,087	-0,8
	115	1/2	-0,6477	—
	115m	11/2	-1,040	-0,6
¹⁰⁹ In	109	9/2	+5,53	+0,86
	110	2	+4,36	+0,36
	110m	7	±10,4	±0,21
	111	9/2	+5,53	+0,85
	112	1	+2,81	+0,089
	112m	4	—	—
	113	9/2	+5,523	+0,82
	114m	5	+4,7	—
	115	9/2	+5,534	+0,83
	115m	1/2	-0,244	—
	116m	5	+4,3	—
	117	9/2	—	—
	117m	1/2	-0,2515	—
¹¹⁰ Sn	113	1/2	±0,88	—
	115	1/2	-0,918	—
	117	1/2	-1,000	—
	119	1/2	-1,046	—
	119m	(3/2)	+0,68	-0,08
	121	3/2	±0,70	±0,08
¹¹¹ Sb	115	5/2	+3,46	-0,27
	116	3	—	—
	117	5/2	+2,67	-0,4
	118m	1	±2,5	—
	119	5/2	+3,45	-0,30
	120	1	±2,3	—
	121	5/2	+3,359	-0,29
	121m	(7/2)	+2,51	-0,4
	122	2	-1,90	+0,69
	123	7/2	+2,547	-0,37
	124	3	—	—
	125	(7/2)	±2,6	—
¹¹² Te	117	1/2	—	—
	119	1/2	±0,25	—
	119m	11/2	—	—
	123	1/2	-0,7359	—
	125	1/2	-0,8871	—
	125m	3/2	+0,60	-0,2
¹¹³ I	123	5/2	—	—
	124	2	—	—
	125	5/2	+3,0	-0,89
	126	2	—	—
	127	5/2	+2,808	-0,79
	127m	(7/2)	—	-0,71
	128	1	—	—
	129	7/2	+2,617	-0,55
	129m	(5/2)	+2,8	-0,68

Эле- мент	A	I, $h/2\pi$	μ	Q, барн
^{63}I	130	5	—	—
	131	7/2	+2,74	-0,40
	132	4	$\pm 3,08$	$\pm 0,08$
	133	7/2	+2,84	-0,26
	135	7/2	—	—
^{64}Xe	129	1/2	-0,7768	—
	129 <i>m</i>	(3/2)	—	$\pm 0,41$
	131	3/2	+0,6908	-0,12
^{65}Cs	125	1/2	+1,41	—
	127	1/2	+1,46	—
	129	1/2	+1,479	—
	130	1	$\pm 1,4$	—
	131	5/2	+3,54	-0,57
	132	2	+2,22	+0,46
	133	7/2	+2,578	-0,003
	134	4	+2,990	+0,36
	134 <i>m</i>	8	+1,096	—
	135	7/2	+2,729	+0,044
	136	5	+3,70	—
	137	7/2	+2,838	+0,045
	138	3	$\pm 0,5$	—
^{66}Ba	135	3/2	+0,8365	+0,18
	137	3/2	+0,9357	+0,28
^{67}La	138	5	+3,707	$\pm 0,8$
	139	7/2	+2,778	+0,22
	140	3	—	—
^{68}Ce	141	7/2	$\pm 0,9$	—
	143	3/2	—	—
^{69}Pr	141	5/2	+4,3	-0,07
	142	2	$\pm 0,25$	$\pm 0,03$
	143	7/2	—	—
	143	7/2	—	—
^{60}Nd	141	3/2	—	—
	143	7/2	-1,08	-0,48
	145	7/2	-0,66	-0,25
	147	5/2	$\pm 0,59$	—
	149	5/2	—	—
^{61}Pm	147	7/2	+2,7	+0,7
	148	1	+2,0	+0,2
	149	7/2	—	—
	151	5/2	$\pm 1,6$	$\pm 1,9$
	151	5/2	$\pm 1,6$	$\pm 1,9$
^{62}Sm	147	7/2	-0,813	-0,20
	149	7/2	-0,670	+0,058
	153	3/2	-0,022	+1,0
	155	3/2	—	$\pm 0,9$
^{63}Eu	151	5/2	+3,464	+1,1
	152	3	$\pm 1,924$	$\pm 3,0$

Эле- мент	A	I, $h/2\pi$	μ	Q, барн
^{63}Eu	152 <i>m</i>	0	—	—
	153	5/2	+1,530	+2,8
	154	3	$\pm 2,000$	—
^{64}Gd	153	3/2	—	—
	155	3/2	-0,254	+1,3
	157	3/2	-0,339	+1,7
	159	3/2	—	—
^{65}Tb	157	(3/2)	$\pm 2,0$	—
	158	3	$\pm 1,74$	+2,7
	159	3/2	$\pm 1,99$	+1,3
	160	3	$\pm 1,68$	+3,0
	161	3/2	—	—
^{66}Dy	159	3/2	—	—
	161	5/2	-0,46	+2,3
	163	5/2	+0,64	+2,5
	165	7/2	$\pm 0,50$	—
^{67}Ho	161	7/2	—	—
	165	7/2	+4,72	+3,0
	166	0	—	—
^{68}Er	163	5/2	+1,1	+3,9
	165	5/2	$\pm 0,65$	$\pm 2,2$
	167	7/2	-0,564	+2,8
	169	1/2	+0,513	—
	171	5/2	$\pm 0,70$	$\pm 2,3$
^{69}Tm	163	1/2	$\pm 0,08$	—
	165	1/2	—	—
	166	2	$\pm 0,047$	$\pm 4,5$
	167	1/2	—	—
	169	1/2	-0,232	—
	170	1	$\pm 0,246$	$\pm 0,59$
	171	1/2	$\pm 0,229$	—
^{70}Yb	171	1/2	+0,4919	—
	173	5/2	-0,6776	+3,0
^{71}Lu	169	7/2	—	—
	170	0	—	—
	171	7/2	—	—
	175	7/2	+2,23	+5,6
	176	7	+3,18	+8,0
	176 <i>m</i>	1	+0,318	-2,3
	177	7/2	+2,24	+5,4
^{72}Hf	177	7/2	+0,61	+3
	179	9/2	-0,47	+3
^{73}Ta	181	7/2	+2,36	+4,2
	181 <i>m</i>	(9/2)	+5,1	+3
	183	7/2	—	—

Продолжение табл. 37.4

Эле- мент	A	I, $h/2\pi$	μ	Q, барн
⁷⁴ W	183	1/2	+0,117	—
	185	3/2	—	—
	187	3/2	—	—
⁷⁵ Re	185	5/2	+3,172	+2,7
	186	1	$\pm 1,73$	$\sim \pm 0,4$
	187	5/2	+3,204	+2,6
	188	1	$\pm 1,78$	$\sim \pm 0,4$
⁷⁶ Os	187	1/2	+0,0643	—
	189	3/2	+0,6566	+0,8
⁷⁷ Ir	191	3/2	+0,145	+1,3
	192	4	—	—
	193	3/2	+0,158	+1,2
	194	1	—	—
⁷⁸ Pt	195	1/2	+0,6060	—
	197	1/2	—	—
⁷⁹ Au	190	1	$\pm 0,066$	—
	191	3/2	$\pm 0,137$	—
	192	1	$\pm 0,00785$	—
	193	3/2	$\pm 0,139$	—
	194	1	$\pm 0,074$	—
	195	3/2	$\pm 0,147$	—
	196	2	$\pm 0,6$	—
	196 m	12	—	—
	197	3/2	+0,14486	+0,58
	198	2	+0,590	—
	199	3/2	+0,270	—
⁸⁰ Hg	193	3/2	-0,62	-2
	193 m	13/2	-1,063	-1,2
	195	1/2	+0,538	—
	195 m	13/2	-1,049	+1,3
	197	1/2	+0,524	—
	197 m	13/2	-1,032	+1,5
	199	1/2	+0,5027	—
	201	3/2	-0,5567	+0,45
	203	5/2	+0,84	—
⁸¹ Tl	195	1/2	—	—
	197	1/2	+1,55	—
	198	2	—	—
	198 m	7	—	—
	199	1/2	+1,59	—
	200	2	—	—
	201	1/2	+1,60	—
	202	2	—	—
	203	1/2	+1,6115	—
	204	2	$\pm 0,089$	—
	205	1/2	+1,6274	—
	206	0	—	—

Продолжение табл. 37.4

Эле- мент	A	I, $h/2\pi$	μ	Q, барн
⁸² Pb	207	1/2	+0,5895	—
⁸³ Bi	199	9/2	—	—
	200	7	—	—
	201	9/2	—	—
	202	5	—	—
	203	9/2	+4,59	-0,64
	204	6	+4,25	-0,41
	205	9/2	+5,5	—
	206	6	+4,56	-0,19
	209	9/2	+4,080	-0,35
	210	1	$\pm 0,0442$	$\pm 0,13$
⁸⁴ Po	201	3/2	—	—
	203	5/2	—	—
	205	5/2	$\sim +0,26$	$\pm 0,17$
	207	5/2	$\sim +0,27$	$\pm 0,28$
	209	1/2	+0,76	—
⁸⁵ At	211	9/2	—	—
⁸⁶ Ac	227	3/2	+1,1	+1,7
⁹⁰ Th	229	5/2	+0,38	$\sim \pm 4,6$
⁹¹ Pa	231	3/2	$\pm 1,98$	—
	233	3/2	+3,4	-3,0
⁹² U	233	5/2	+0,54	+3,5
	235	7/2	-0,35	+4,1
⁹³ Np	237	5/2	+3,3	—
	238	2	—	—
	239	5/2	—	—
⁹⁴ Pu	239	1/2	+0,200	—
	241	5/2	-0,73	+5,6
⁹⁵ Am	241	5/2	+1,59	+4,9
	242	1	$\pm 0,382$	$\pm 2,8$
	243	5/2	+1,4	+4,9
⁹⁷ Bk	249	7/2	—	—
⁹⁹ Es	253	7/2	—	—

37.5. РАДИОАКТИВНЫЕ РЯДЫ

На рис. 37.1—37.4 представлены соответственно радиоактивные ряды тория ($4n$), нептуния ($4n + 1$), урана ($4n + 2$) и актиноурана ($4n + 3$). Указаны химический символ элемента, массовое число ядра и его период полураспада. В скобках приведены старые

названия естественных радиоактивных нуклидов. Символы у стрелок указывают тип распада (α ; β ; и. п. — изомерный переход). Если изотоп распадается двумя путями, то у стрелок указано (в %) относительное ветвление типов распада. Пунктирные стрелки соответствуют предполагаемым или очень слабоинтенсивным типам распада.

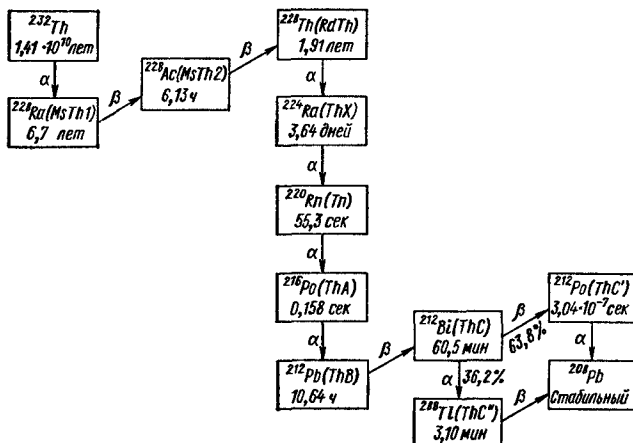


Рис. 37.1. Ториевая серия ($4n$) [8].

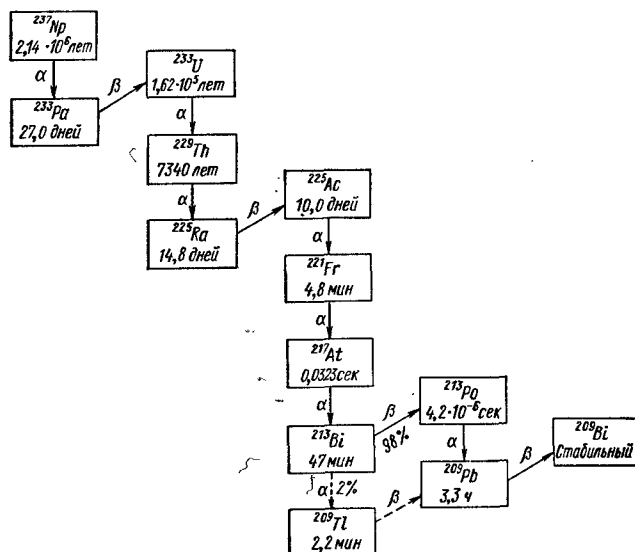


Рис. 37.2. Нептунневая серия ($4n + 1$) [8].

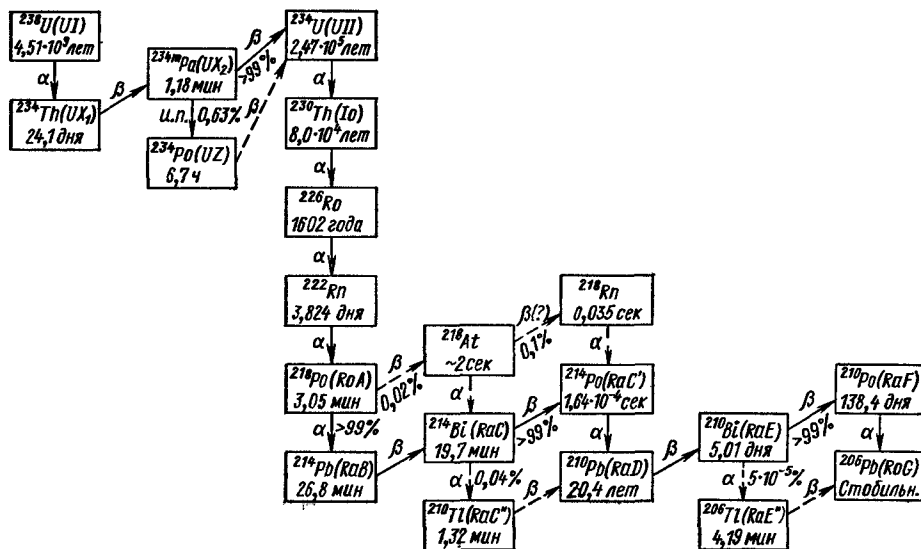


Рис. 37.3. Уран-радиевая серия ($4n + 2$) [8].

Т а б л и ц а 37.5

Старые названия естественных радиоактивных нуклидов [7]

Обозначение	Название	Символ	Радиоактивный ряд
Ac	Актиний	²²⁷ Ac	Ac
AcA	Актиний А	²¹⁵ Po	Ac
AcB	Актиний В	²¹¹ Pb	Ac
AcC	Актиний С	²¹¹ Bi	Ac
AcC'	Актиний С'	²¹¹ Po	Ac
AcC''	Актиний С''	²⁰⁷ Tl	Ac
AcD	Актиний D	²⁰⁷ Pb	Ac
AcK	Актиний К	²²³ Fr	Ac
AcU	Актиноуран	²³⁵ U	Ac
AcX	Актиний X	²²³ Ra	Ac
AcEm	Актинон (Ап)	²¹⁹ Rn	Ac
Pa	Протактиний	²³¹ Pa	Ac
RdAc	Радиоактиний	²²⁷ Th	Ac
UY	Уран Y	²³¹ Th	Ac
Io	Ионий	²³⁰ Th	U
Ra	Радий	²²⁶ Ra	U
RaA	Радий А	²¹⁸ Po	U
RaB	Радий В	²¹⁴ Pb	U
RaC	Радий С	²¹⁴ Bi	U
RaC'	Радий С'	²¹⁴ Po	U
RaC''	Радий С''	²¹⁰ Tl	U
RaD	Радий D	²¹⁰ Pb	U
RaE	Радий E	²¹⁰ Bi	U

Обозначение	Название	Нуклид	Радиоактивный ряд
RaE''	Радий E''	²⁰⁶ Tl	U
RaF	Радий F	²¹⁰ Po	U
RaEm	Радон (Rn)	²²² Rn	U
RaG	Радий G	²⁰⁸ Pb	U
UI	Уран I	²³⁸ U	U
UII	Уран II	²³⁴ U	U
UX ₁	Уран X ₁	²³⁴ Th	U
UX ₂	Уран X ₂	^{234m} Pa	U
UZ	Уран Z	²³⁴ Pa	U
MsTh ₁	Мезоторий-1	²²⁸ Ra	Th
MsTh ₂	Мезоторий-2	²²⁸ Ac	Th
RdTh	Радиоторий	²²⁸ Th	Th
Th	Торий	²³² Th	Th
ThA	Торий A	²¹⁶ Po	Th
ThB	Торий B	²¹² Pb	Th
ThC	Торий C	²¹² Bi	Th
ThC'	Торий C'	²¹² Po	Th
ThC''	Торий C''	²⁰⁸ Tl	Th
ThD	Торий D	²⁰⁸ Pb	Th
ThX	Торий X	²²⁴ Ra	Th
ThEm	Торон (Tn)	²²⁰ Rn	Th

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lederer C. M., Hollander J. M., Perlman I. Table of Isotopes. Sixth ed. New York — London — Sydney, John Wiley and Sons, Inc., 1967.
2. Seelman-Eggebert W., Pfennig G., Münzel H. Nuklidkarte. 3 Auflage. München, Gersbach und Sohn Verlag, 1968.
3. Баранов С. А., Кулаков В. М., Шатинский В. М. «Ядерная физика», 1969, т. 7, вып. 4, с. 727.
4. Баранов С. А., Шатинский В. М., Кулаков В. М. «Ядерная физика», 1971, т. 14, вып. 5, с. 1101.
5. Баранов С. А., Зеленков А. Г., Кулаков В. М. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1960, т. 24, № 9, с. 1035.
6. "Nuclear Data Tables", sec. A, 1969, v. 5, N 5—6.
7. Дзепелов Б. С., Пекер Л. К., Сергеев В. О. Схемы распада радиоактивных ядер. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1963, с. 1039.
8. Kirby H. W. The Analytical Chemistry of Actinium. Miamisburg Ohio, Mound Lab., NAT-33-1-GEN-53.

МЁССБАУЭРОВСКИЕ ЯДРА

38.1. ВВЕДЕНИЕ

Эффектом Мёссбауэра называется упругое (без потери энергии на отдачу) излучение или поглощение γ -квантов ядрами атомов, не сопровождающееся изменением внутренней энергии тела.

Чрезвычайно высокое энергетическое разрешение, наблюдаемое в опытах по эффекту Мёссбауэра $\Gamma/E_0 = 10^{-10} - 10^{-15}$ (Γ — естественная ширина ядерного уровня, E_0 — энергия ядерного γ -перехода), позволяет не только измерять очень малые изменения энергии ($\sim 10^{-10}$ эв), но и наблюдать сверхтонкую структуру ядерных уровней, обусловленную магнитным дипольным и электрическим квадрупольным электронно-ядерными взаимодействиями.

Спектр прошедшего через поглотитель излучения, получаемый обычно в опытах по эффекту Мёссбауэра при относительноном (со скоростью v) движении источника и поглотителя, обусловлен изменением энергии γ -кванта $\Delta E = E_0 v/c$ (c — скорость света) за счет эффекта Доплера. Этот спектр $\epsilon(x)$ определяется выражением [1]:

$$\epsilon(x) = f_S \int_{-\infty}^{+\infty} \{1 - \exp[-f_A n \sigma(y)]\} F(y) dy,$$

где $\epsilon(x) = \frac{1}{N_{\gamma}} (N_{v_{\infty}} - N_v)$; N_v — интенсивность γ -из-

лучения при относительной скорости v ; $N_{v_{\infty}}$ — интенсивность вне резонанса; $x = 2(E_0/\Gamma) \cdot (v/c)$; $y = 2(E_v - E_0)/\Gamma$; E_v — энергия γ -кванта при относительной скорости v ; $\Gamma = \hbar/\tau$; τ — среднее время жизни возбужденного состояния ядра; $\sigma = \sigma_0/(1 + y^2)$ — сечение по-

глощения γ -кванта с энергией E_v , где $\sigma_0 = \frac{2I_1 + 1}{2I_0 + 1} \frac{2\pi\lambda^2}{1 + \alpha}$;

I_0, I_1 — спины основного и возбужденного состояний ядра; $\lambda = hc/E$ — приведенная длина волны γ -излучения; α — коэффициент внутренней конверсии; f_S, f_A — значения вероятностей излучения и поглощения γ -кванта без отдачи; $n, \text{см}^{-2}$ — число ядер мёссбауэровского нуклида на единицу площади; $F(y)$ — форма линии излучения.

Максимум величины $\epsilon(x)$ и площадь спектра S для лоренцевской формы линии при $v = 0$ даются выражениями:

$$\epsilon(0) = f_S [1 - \exp(-f_A n \sigma_0/2)] I_0(f_A n \sigma_0/2);$$

$$S = \int_{-\infty}^{+\infty} \epsilon(x) dx = \pi n \sigma_0 f_S f_A [I_0(if_A n \sigma_0/2) + I_1(if_A n \sigma_0/2)],$$

где I_0 и I_1 — функции Бесселя нулевого и первого порядков мнимого аргумента.

Основными параметрами мёссбауэровских спектров являются:

1) *изомерный сдвиг* δ мёссбауэровской линии, обусловленный разностью радиусов ядра в основном и возбужденном состояниях R_0 и R_1 , и разностью плотностей электронов на ядрах поглотителя и источника $|\psi_A(0)|^2$ и $|\psi_S(0)|^2$, соответственно:

$$\delta = \frac{4\pi}{5} Ze^2 (R_1^2 - R_0^2) \{ |\psi_A(0)|^2 - |\psi_S(0)|^2 \},$$

где e — элементарный заряд, Z — порядковый номер ядра [1];

2) *квадрупольное расщепление* Δ ядерных уровней мёссбауэровской линии, вызванное взаимодействием квадрупольного момента Q ядра с неоднородным электрическим полем, существующим в месте расположения ядра (например, в кристалле с симметрией ниже кубической). $\Delta = E_i - E_k$, где энергии E_i и E_k — собственные значения гамильтониана квадрупольного взаимодействия, принадлежащие различным значениям спина ядра и магнитного квантового числа m_I [2, 3]. В частном случае аксиально-симметричного градиента поля для значения $I = 3/2$:

$$\Delta = E\left(\frac{3}{2}, \frac{3}{2}\right) - E\left(\frac{3}{2}, \frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2} e^2 q Q.$$

Здесь q — градиент электрического поля;

3) *магнитное расщепление ядерных уровней*, вызванное взаимодействием дипольного магнитного момента ядра $\bar{\mu}$ со сверхтонким магнитным полем на ядре $\bar{H}_A$, которое создается электронами собственного атома и поляризованными электронами проводимости.

Магнитное расщепление ядерных уровней определяется выражением:

$$\Delta E_m = \bar{\mu} \cdot \bar{H}_A / I = g \mu_N H_A,$$

где μ_N — ядерный магнетон; g — гиромагнитное отношение (ядерный g -фактор). Расстояние между соседними уровнями равно $g \mu_N H_A$, а расстояние между наивысшим и наинизшим уровнями равно $2g \mu_N H_A$ [2, 3].

38.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ МЁССБАУЭРОВСКИХ ЯДЕР

В табл. 38.1 приведены сведения о материнских изотопах мёссбауэровского ядра (массовое число, тип распада и период полураспада) и следующие характеристики мёссбауэровских ядер:

E — энергия мёссбауэровского γ -перехода (в некоторых случаях приведены значения энергий двух различных γ -переходов, на которых наблюдается эффект Мёссбауэра);

Содержание мёссбауэровского изотопа в естественной смеси изотопов;

$T_{1/2}$ — период полураспада резонансного уровня (время жизни);

Γ — естественная ширина уровня;

$\Delta \nu (\Gamma)$ — доплеровская ширина уровня;

$E_{отд}$ — энергия отдачи свободного ядра;

α — полный коэффициент конверсии для резонансного γ -перехода;

σ_0 — полное сечение резонансного поглощения;

I_0 и I_1 — значения спиннов основного и возбужденного уровней ядра;

μ_0 и μ_1 — значения магнитных моментов основного и возбужденного уровней ядра в ядерных магнетонах;

Q_0 и Q_1 — значения квадрупольных моментов основного и возбужденного уровней ядра.

Ядро	Содержа- ние. %	E , кэв	$T_{1/2}$, сек	Γ , кэв	Δv (Г), мм/сек	$E_{\text{отд}}$, кэв	α	σ_0 , см ²
⁴⁰ ₁₉ K	0,0118	29,4	$3,9 \cdot 10^{-9}$	$1,170 \cdot 10^{-10}$	1,193	$1,160 \cdot 10^{-6}$	0,35	$1,631 \cdot 10^{-18}$
⁵⁷ ₂₆ Fe	2,19	14,4125	$9,77 \cdot 10^{-8}$	$4,6697 \cdot 10^{-12}$	0,09713	$1,9567 \cdot 10^{-6}$	9,00	$2,386 \cdot 10^{-18}$
		136,4	$8,7 \cdot 10^{-9}$	$5,244 \cdot 10^{-11}$	0,1152	$1,753 \cdot 10^{-4}$	0,142	$4,214 \cdot 10^{-20}$
⁶¹ ₂₈ Ni	1,19	67,4	$5,3 \cdot 10^{-9}$	$8,608 \cdot 10^{-11}$	0,3829	$3,999 \cdot 10^{-5}$	0,12	$7,212 \cdot 10^{-19}$
⁶⁷ ₃₀ Zn	4,11	93,0	$9,4 \cdot 10^{-6}$	$4,854 \cdot 10^{-14}$	$1,564 \cdot 10^{-4}$	$6,931 \cdot 10^{-5}$	0,6	$1,179 \cdot 10^{-19}$
⁷³ ₃₂ Ge	7,76	67,0	$1,62 \cdot 10^{-9}$	$2,816 \cdot 10^{-10}$	1,26	$3,302 \cdot 10^{-5}$	0,229	$4,434 \cdot 10^{-19}$
⁸³ ₃₆ Kr	11,55	9,3	$1,47 \cdot 10^{-7}$	$3,104 \cdot 10^{-12}$	0,1000	$5,595 \cdot 10^{-7}$	11	$1,886 \cdot 10^{-18}$
⁹⁹ ₄₄ Ru	12,72	90,0	$2,02 \cdot 10^{-8}$	$2,259 \cdot 10^{-11}$	0,07525	$4,393 \cdot 10^{-5}$	—	$1,007 \cdot 10^{-19}$
¹⁰⁷ ₄₇ Ag	51,35	93	44	$1,037 \cdot 10^{-20}$	$3,342 \cdot 10^{-11}$	$4,34 \cdot 10^{-5}$	20	$5,388 \cdot 10^{-20}$
¹¹⁹ ₅₀ Sn	8,58	23,875	$1,84 \cdot 10^{-8}$	$2,48 \cdot 10^{-11}$	0,31135	$2,572 \cdot 10^{-6}$	5,5	$1,321 \cdot 10^{-18}$
¹²¹ ₅₁ Sb	57,25	37,15	$3,5 \cdot 10^{-9}$	$1,304 \cdot 10^{-10}$	1,052	$6,124 \cdot 10^{-6}$	10,6	$2,037 \cdot 10^{-19}$
¹²⁵ ₅₂ Te	6,99	35,48	$1,48 \cdot 10^{-9}$	$3,083 \cdot 10^{-10}$	2,6045	$5,407 \cdot 10^{-6}$	13,3	$2,718 \cdot 10^{-19}$
¹²⁷ ₅₃ I	100	57,6	$1,86 \cdot 10^{-9}$	$2,453 \cdot 10^{-10}$	1,2765	$1,403 \cdot 10^{-5}$	3,75	$2,07 \cdot 10^{-19}$
¹²⁹ ₅₃ I	Нестабилен	27,75	$1,61 \cdot 10^{-8}$	$2,834 \cdot 10^{-11}$	0,30615	$3,205 \cdot 10^{-6}$	5,0	$3,971 \cdot 10^{-19}$
¹²⁹ ₅₄ Xe	26,44	39,58	$9,85 \cdot 10^{-10}$	$4,632 \cdot 10^{-10}$	3,508	$6,521 \cdot 10^{-6}$	11	$2,603 \cdot 10^{-19}$
¹³¹ ₅₄ Xe	12,18	80,16	$4,5 \cdot 10^{-10}$	$1,014 \cdot 10^{-9}$	3,791	$2,634 \cdot 10^{-5}$	2,1	$6,141 \cdot 10^{-20}$
¹³³ ₅₅ Cs	100	80,99	$6,28 \cdot 10^{-9}$	$7,265 \cdot 10^{-11}$	0,2689	$2,648 \cdot 10^{-5}$	1,63	$1,064 \cdot 10^{-19}$
¹⁴¹ ₅₉ Pr	100	145,43	$1,92 \cdot 10^{-9}$	$2,376 \cdot 10^{-10}$	0,4898	$8,054 \cdot 10^{-5}$	0,45	$1,064 \cdot 10^{-19}$
¹⁴⁹ ₆₂ Sm	13,83	22	$7,6 \cdot 10^{-9}$	$6,003 \cdot 10^{-11}$	0,818	$1,744 \cdot 10^{-6}$	12	$3,888 \cdot 10^{-19}$
¹⁵¹ ₆₃ Eu	47,82	21,6	$8,8 \cdot 10^{-9}$	$5,184 \cdot 10^{-11}$	0,7195	$1,659 \cdot 10^{-6}$	29	$2,33 \cdot 10^{-19}$
¹⁵³ ₆₃ Eu	52,18	97,43	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$2,851 \cdot 10^{-9}$	8,775	$3,331 \cdot 10^{-5}$	0,41	$1,817 \cdot 10^{-19}$
		103,18	$3,86 \cdot 10^{-9}$	$1,182 \cdot 10^{-10}$	0,3434	$3,736 \cdot 10^{-5}$	1,55	$5,972 \cdot 10^{-20}$
¹⁵⁵ ₆₄ Gd	14,73	60,0	$2,4 \cdot 10^{-10}$	$1,901 \cdot 10^{-9}$	9,50	$1,247 \cdot 10^{-5}$	7,5	$1,199 \cdot 10^{-19}$

ровских ядер

I_0	I_1	μ_0	μ_1	Q_0 , барн	Q_1 , барн	Сведения о материнском ядре
4^-	3^-	-1,298	—	-0,093	—	$^{39}_{19}\text{K}$, (n , γ)
1^-	3^-	+0,09024	0,1547	0	+0,33	^{57}Mn , (β^-); 1,7 мин; ^{57}Co , (э. з.); 270 дней
2	2	—	—	—	—	
1^-	5^-	—	—	—	—	
2	2	—	—	—	—	
3^-	5^-	0,746	+0,35	—	—	^{61}Co , (β^-); 1,7 ч; ^{61}Cu (β^+); 3,3 ч
2	2	—	—	—	—	
5^-	3^-	+0,876	—	+0,17	—	^{67}Cu , 60 ч; ^{67}Ga , 78 ч
2	2	—	—	—	—	
9^+	$\frac{9}{2}; \frac{11^+}{2}$	-0,8792	—	-0,26	—	^{73}Ga , 4,8 ч; ^{73}As , 76 дней
2	2	—	—	—	—	
9^+	7^+	-0,970	—	+0,26	+0,44	^{83}Br , 2,4 ч; ^{83}Rb , 83 дня
2	2	—	—	—	—	
5^+	3^+	-0,625	-0,285	—	0,15	^{99}Rh , 16,1 дня; ^{99}Tc , $2,1 \cdot 10^5$ лет
2	2	—	—	—	—	
1^-	7^+	-0,1136	—	—	—	^{107}Cd , (э.з., β^+); 6,6 ч; ^{107}Pd , (β^-); $7 \cdot 10^6$ лет
2	2	—	—	—	—	
1^+	3^+	-1,046	+0,7	0	-0,07	^{110m}In , 18 мин; ^{110}In , 2,3 мин;
2	2	—	—	—	—	^{110}Sb , 38 ч; ^{110m}Sn , 245 дней
5^+	7^+	+3,359	—	-0,29	—	^{121m}Sn , >5 лет; ^{121}Sn , 27 ч;
2	2	—	—	—	—	^{121m}Te , 154 дня; ^{121}Te , 17 дней
1^+	3^+	-0,8872	+0,65	0	0,19	^{125}Sb , 2,7 года; ^{125}I , 57 дней
2	2	—	—	—	—	
5^+	7^+	+2,808	1,96	-0,79	-0,71	^{127m}Te , 105 дней; ^{127}Te , 9,3 ч; ^{127}Xe , 36 дней
2	2	—	—	—	—	
7^+	5^+	+2,617	+2,84	-0,55	-0,68	^{129m}Te , 33 дня; ^{129}Te , 70 мин
2	2	—	—	—	—	
1^+	3^+	-0,7768	—	0	-0,41	^{129}I , $1,6 \cdot 10^7$ лет; ^{129}Cs , 32 ч
2	2	—	—	—	—	
3^+	1^+	+0,6908	—	-0,12	—	^{131}I , 8,1 дня; ^{131}Cs , 10 дней
2	2	—	—	—	—	
7^+	5^+	+2,579	+3,25	-0,003	—	^{133}Ba , (э.з.); 7,2 года; ^{133}Xe , (β^-), 5,3 дня
2	2	—	—	—	—	
5^+	7^+	+4,3	—	-0,06	—	^{141}Nd , 25 ч; ^{141}Ce , 33 дня
2	2	—	—	—	—	
7^-	$\frac{7^-}{2}; \frac{5^-}{2}$	-0,75	-1,32; -0,94	+0,06	—	^{149}Pm , 53 ч; ^{149}Eu , 106 дней
2	2	—	—	—	—	
5^+	7^+	+3,464	+2,57	+1,155	+1,5	^{151}Gd , 120 дней; ^{151}Sm , 93 года
2	2	—	—	—	—	
5^+	5^-	+1,530	+3,21	+2,93	—	^{158}Gd , (э.з.); 242 дня; ^{158}Sm , (β^-) 47 ч
2	2	—	—	—	—	
5^+	3^+	—	+2,03	—	—	
2	2	—	—	—	—	
3^-	5^-	-0,27	—	+1,3	—	^{155}Eu , (β^-), 1,81 года; ^{155}Tb , 5 дней
2	2	—	—	—	—	

Ядро	Содержа- ние, %	E , кэв	$T_{1/2}$, сек	Γ , кэв	Δv (Г), мм/сек	$E_{отд}$, кэв	α	σ_0 , см ²
¹⁵⁵ ₆₄ Cd	14,73	86,5	$6,15 \cdot 10^{-9}$	$7,418 \cdot 10^{-11}$	0,2571	$2,592 \cdot 10^{-5}$	0,49	$2,164 \cdot 10^{-19}$
¹⁵⁶ ₆₄ Gd	20,47	88,97	$2,19 \cdot 10^{-9}$	$2,083 \cdot 10^{-10}$	0,702	$2,725 \cdot 10^{-5}$	4,08	$3,042 \cdot 10^{-19}$
¹⁵⁸ ₆₄ Gd	24,87	79,51	$2,4 \cdot 10^{-9}$	$1,901 \cdot 10^{-10}$	0,717	$2,148 \cdot 10^{-5}$	5,94	$2,788 \cdot 10^{-19}$
¹⁵⁹ ₆₅ Tb	100	58,0	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$3,509 \cdot 10^{-9}$	18,14	$1,136 \cdot 10^{-5}$	10,1	$9,827 \cdot 10^{-20}$
¹⁶⁰ ₆₆ Dy	2,29	86,8	$2,00 \cdot 10^{-9}$	$2,281 \cdot 10^{-10}$	0,788	$2,528 \cdot 10^{-5}$	4,61	$2,894 \cdot 10^{-19}$
¹⁶¹ ₆₆ Dy	18,88	25,65	$2,87 \cdot 10^{-8}$	$1,59 \cdot 10^{-11}$	0,1858	$2,194 \cdot 10^{-6}$	2,5	$1,062 \cdot 10^{-18}$
		74,58	$3,1 \cdot 10^{-9}$	$1,472 \cdot 10^{-10}$	0,5915	$1,855 \cdot 10^{-5}$	0,65	$3,216 \cdot 10^{-20}$
¹⁶⁶ ₆₈ Er	33,41	80,6	$1,82 \cdot 10^{-9}$	$2,507 \cdot 10^{-10}$	0,9325	$2,101 \cdot 10^{-5}$	7,2	$2,296 \cdot 10^{-19}$
¹⁶⁹ ₆₉ Tm	100	8,41	$3,9 \cdot 10^{-9}$	$1,17 \cdot 10^{-10}$	4,17	$2,247 \cdot 10^{-7}$	325	$2,122 \cdot 10^{-19}$
¹⁷⁰ ₇₀ Yb	3,03	84,26	$1,59 \cdot 10^{-9}$	$2,869 \cdot 10^{-10}$	1,021	$2,242 \cdot 10^{-5}$	6,70	$2,237 \cdot 10^{-19}$
¹⁷¹ ₇₀ Yb	14,31	66,73	$>5 \cdot 10^{-10}$	$9,125 \cdot 10^{-10}$	4,0995	$1,398 \cdot 10^{-5}$	10	$9,989 \cdot 10^{-20}$
¹⁷⁷ ₇₂ Hf	18,50	112,96	$5 \cdot 10^{-10}$	$9,125 \cdot 10^{-10}$	2,4215	$3,871 \cdot 10^{-5}$	2,47	$6,906 \cdot 10^{-20}$
¹⁸¹ ₇₃ Ta	99,99	6,25	$6,8 \cdot 10^{-6}$	$6,709 \cdot 10^{-14}$	$3,218 \cdot 10^{-3}$	$1,159 \cdot 10^{-7}$	45	$1,702 \cdot 10^{-18}$
¹⁸² ₇₄ W	26,41	100,1	$1,37 \cdot 10^{-9}$	$3,33 \cdot 10^{-10}$	0,9975	$2,956 \cdot 10^{-5}$	3,97	$2,456 \cdot 10^{-19}$
¹⁸³ ₇₄ W	14,40	46,48	$2,0 \cdot 10^{-10}$	$2,281 \cdot 10^{-9}$	14,715	$6,339 \cdot 10^{-6}$	9,0	$2,265 \cdot 10^{-19}$
		99,08	$6,0 \cdot 10^{-10}$	$7,604 \cdot 10^{-10}$	2,300	$2,88 \cdot 10^{-5}$	4,3	$6,855 \cdot 10^{-20}$
¹⁸⁴ ₇₄ W	30,64	111,2	$1,26 \cdot 10^{-9}$	$3,621 \cdot 10^{-10}$	0,976	$3,608 \cdot 10^{-5}$	2,75	$2,638 \cdot 10^{-19}$
¹⁸⁶ ₇₄ W	28,41	122,5	$1,05 \cdot 10^{-9}$	$4,345 \cdot 10^{-10}$	1,063	$4,332 \cdot 10^{-5}$	1,72	$2,997 \cdot 10^{-19}$
¹⁸⁶ ₇₆ Os	1,64	137,2	$8,4 \cdot 10^{-10}$	$5,431 \cdot 10^{-10}$	1,187	$5,434 \cdot 10^{-5}$	1,25	$2,888 \cdot 10^{-19}$
¹⁸⁷ ₇₅ Re	62,93	134,24	$1,0 \cdot 10^{-11}$	$4,562 \cdot 10^{-8}$	101,9	$5,174 \cdot 10^{-5}$	2,35	$5,403 \cdot 10^{-20}$
¹⁸⁸ ₇₆ Os	13,3	155,03	$7,1 \cdot 10^{-10}$	$6,426 \cdot 10^{-10}$	1,2425	$6,864 \cdot 10^{-5}$	0,84	$2,766 \cdot 10^{-19}$

I_0	I_1	μ_0	μ_1	Q_0 , барн	Q_1 , барн	Сведения о материнском ядре
$\frac{3^-}{2}$	$\frac{3^+}{2}$	-0,27	-0,564	—	—	
0^+	2^+	—	—	—	—	^{156}Eu , 15 дней; ^{156}Tb , 5,4 дня
0^+	2^+	—	—	—	—	^{158}Eu , 60 мин; ^{158}Tb , 150 лет
$\frac{3^+}{2}$	$\frac{5^+}{2}$	1,7	—	—	—	^{159}Gd , 18 ч; ^{159}Dy , 144 дня
0^+	2^+	—	+0,74	—	-1,0	^{160}Tb , (β^-); 72,4 дня; ^{160}Ho , (э.з., β^+); 25 мин
$\frac{5^+}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	-0,46	+0,55	+1,9	+1,8	^{161}Tb , (β^-), 6,9 дня; ^{161}Ho , (э.з.); 2,48 ч
$\frac{5^+}{2}$	$\frac{3^-}{2}$	—	1,6	—	—	
0^+	2^+	—	0,62	—	-1,9	^{166m}Ho , $1,2 \cdot 10^3$ лет; ^{166}Ho , 27 ч; ^{166}Tm , 7,7 ч
$\frac{1^+}{2}$	$\frac{3^+}{2}$	-0,232	+0,59	—	-1,2	^{169}Er , 9,3 дня; ^{169}Yb , 31 день
0^+	2^+	—	0,668	—	—	^{170}Tm , 127 дней; ^{170}Lu , 2 дня
$\frac{1^-}{2}$	$\frac{3^-}{2}$	+0,4930	—	—	—	^{171}Tm , 1,9 года; ^{171}Lu , 8,2 дня
$\frac{7^-}{2}$	$\frac{9^-}{2}$	+0,61	+1,06	+3,0	—	^{177m}Lu , 155 дней; ^{177}Lu , 6,7 дня; ^{177}Ta , 56,6 ч
$\frac{7^+}{2}$	$\frac{9^-}{2}$	+2,36	—	+4,2	—	^{181}Hf , 45 дней; ^{181}W , 140 дней
0^+	2^+	—	+0,46	—	-1,87	^{182}Ta , 115 дней; ^{182}Re (β^+) 13 ч; (э.з.), 64 ч
$\frac{1^-}{2}$	$\frac{3^-}{2}$	+0,117	—	—	-1,61	
$\frac{1^-}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	+0,117	—	—	—	^{188}Ta , 5 дней; ^{188}Re , 70 дней
0^+	2^+	—	0,52	—	-2,0	^{184}Ta , 8,7 ч; ^{184m}Re , 165 дней; ^{184}Re , 38 дней
0^+	2^+	—	+0,64	—	—	^{186}Ta , 10 мин; ^{186}Re , 90 ч
0^+	2^+	—	+0,64	—	1,54	^{186}Re , 90 ч; ^{186}Ir (β^+), 15 ч; (э.з.), 1,7 ч
$\frac{5^+}{2}$	$\frac{7}{2}$	+3,204	—	+2,6	—	^{187}W , 23,8 ч
0^+	2^+	—	0,56	—	—	^{188}Re , 16,8 ч; ^{188}Ir , 41 ч

Ядро	Содержание, %	E , кэв	$T_{1/2}$, сек	Γ , кэв	$\Delta\nu$ (Γ), мм/сек	$E_{отд}$, кэв	α	σ_0 , см ²
¹⁹¹ ₇₇ Iг	37,3	129,4	$1,28 \cdot 10^{-10}$	$3,564 \cdot 10^{-9}$	8,2575	$4,707 \cdot 10^{-5}$	3,02	$5,452 \cdot 10^{-20}$
¹⁹³ ₇₇ Iг	62,7	73	$6,0 \cdot 10^{-9}$	$7,604 \cdot 10^{-11}$	0,3122	$1,483 \cdot 10^{-5}$	6	$3,279 \cdot 10^{-20}$
¹⁹⁵ ₇₈ Pt	33,8	98,8	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$2,851 \cdot 10^{-9}$	8,65	$2,688 \cdot 10^{-5}$	8,55	$5,248 \cdot 10^{-20}$
		129	$6,2 \cdot 10^{-10}$	$7,359 \cdot 10^{-10}$	1,71	$4,582 \cdot 10^{-5}$	1,79	$7,746 \cdot 10^{-21}$
¹⁹⁷ ₇₉ Au	100	77,3	$1,8 \cdot 10^{-9}$	$2,535 \cdot 10^{-10}$	0,983	$1,629 \cdot 10^{-5}$	3,7	$4,355 \cdot 10^{-20}$
²³⁷ ₉₃ Np	Нестабилен	59,54	$6,3 \cdot 10^{-8}$	$7,242 \cdot 10^{-12}$	$3,646 \cdot 10^{-2}$	$8,032 \cdot 10^{-3}$	1,065	$2,917 \cdot 10^{-19}$
²³⁸ ₉₂ U [6]	Нестабилен	44,7	$2,3 \cdot 10^{-10}$	$1,9836 \cdot 10^{-9}$	13,303	$1,882 \cdot 10^{-5}$	660	$9,2 \cdot 10^{-21}$

38.3. ПАРАМЕТРЫ МЁССБАУЭРОВСКИХ СПЕКТРОВ

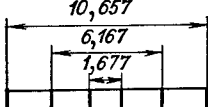
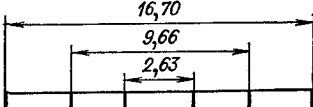
Вещество	Спектр
$Na_2[Fe(CN)_5NO] \cdot 2H_2O$	
Металлическое железо $H_d = 330$ кэ	
$\alpha = Fe_2O_3$ $H_d = 517$ кэ	

Рис. 38.1. Схематическое изображение мёссбауэровских спектров поглощения для ядер ⁵⁷Fe в различных материалах при температуре 300° К [4].

В табл. 38.2 приведены следующие характеристики: формула химического соединения (сплава), которое содержит мёссбауэровские ядра, находящиеся в стабильном состоянии (поглотитель);

формула химического соединения (сплава), содержащего материнские ядра, или химический символ матрицы, в которую введены атомы материнского изотопа (источник). В скобках указан материнский изотоп либо тип ядерной реакции, используемый для создания возбужденного состояния мёссбауэровского ядра;

T — температура поглотителя и источника (в тех случаях, когда температура не указана, более вероятной является комнатная);

Γ — полуширина отдельной линии экспериментально наблюдаемого мёссбауэровского спектра;

ϵ — эффект поглощения, определяемый отношением интенсивностей γ -излучения, зарегистрированных в резонансе ($N_{vрез}$) и вне резонанса ($N_{v\infty}$) к $N_{v\infty}$:

$$\epsilon = (N_{v\infty} - N_{vрез}) / N_{v\infty}.$$

Если ϵ приводится с учетом фона от постороннего излучения, рядом с цифрой стоит индекс «0»;

δ — сдвиг наблюдаемого спектра, отсчитываемый от значения $v = 0$; считается, что δ положителен в случае, когда источник и поглотитель движутся навстречу друг другу (если знак δ не указан, более вероятно положительное значение);

Δ — квадрупольное расщепление;

H_d — сверхтонкое магнитное поле, действующее на ядра атомов мёссбауэровского изотопа в данном веществе (поглотителе);

f_s и f_a — вероятности излучения и поглощения γ -кванта без отдачи энергии.

I_0	I_1	μ_0	μ_1	Q_0 , барн	Q_1 , барн	Сведения о материнском ядре
$\frac{3^+}{2}$	$\frac{1^+}{2}$	+0,18	—	+1,3	—	^{191}Os , 15 дней; ^{191}Pt , 3 дни
$\frac{3^+}{2}$	$\frac{1^+}{2}$	+0,17	0,56	1,5	—	^{193}Os , 32 ч; ^{193}Pt , ≤ 500 лет
$\frac{1^-}{2}$	$\frac{3^-}{2}$	-0,606	-0,65	—	—	^{195}Au , 192 дня; ^{195}Ir , 2,3 ч; ^{195}Ir , 2,3 ч
$\frac{1^-}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	—	—	—	—	
$\frac{3^+}{2}$	$\frac{1^+}{2}$	+0,1449	+0,37	+0,58	—	^{197}Pt , (β^-), 20 ч; ^{197}Hg (э. з.), 65 ч
$\frac{5^+}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	5,0	+2,0	—	—	^{237}U , 6,75 дня; ^{241}Am , 458 лет
$\frac{0^+}{2}$	$\frac{2^+}{2}$	—	+0,25	+10,5	-3,0	^{242}Pu (α), $3,79 \cdot 10^5$ лет

Таблица 38.2

Параметры мёссбауэровских спектров

Поглотитель		Источник		Γ , $\frac{\text{мм}}{\text{сек}}$	z , %	δ , $\frac{\text{мм}}{\text{сек}}$	Δ , $\frac{\text{мм}}{\text{сек}}$	$H_{\text{я}}$, кэ	f_S	t_A
Формула	Температура, °K	Формула	Температура, °K							
KCl	4	KCl (α , ρ)	4	11	16	-0,14	—	—	—	—
Fe	—	Cu (Co)	—	0,20	36	-0,226	—	330	—	—
	—	Pd	—	—	—	-0,185	—	—	—	—
	298	Pt	298	0,22	10 ₀	-0,347	—	—	—	—
	300	Нерж. сталь	300	0,39	16 ₀	+0,090	—	—	—	—
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	—	Cr	—	0,40	—	+0,51	0,40	517	—	—
	300	Нерж. сталь	300	—	—	+0,47	0,40	—	—	—
Нерж. сталь	—	Cr	—	0,48	21	+0,05	—	—	—	—
	—	Cu	—	0,45	45 ₀	-0,32	—	—	—	—
	300	Au	—	0,48	—	-0,78	—	—	0,67	—
	300	UO ₂	—	—	—	0,32	—	—	—	—
	300	Нерж. сталь	300	0,53	47 ₀	—	—	—	—	—
KFeS ₂	298	Pd	298	0,28	18 ₀	-0,01	0,50	—	—	—
Na ₂ [Fe(CN) ₅ NO]·2H ₂ O	—	Cu	—	—	—	-0,56	—	—	—	—
Na ₂ [Fe(CN) ₅ NO]·2H ₂ O	—	Pt	300	0,26	21	-0,61	1,712	—	—	—
	300	Нерж. сталь	298	0,38	13 ₀	-0,18	1,712	—	—	—
Ni	80	Ni (кул. возб.)	80	3,3	4	—	—	—	0,09	0,09
	77	Ni (кул. возб.)	77	—	—	—	—	90	—	—

Поглотитель		Источник		Γ , $\frac{\text{мм}}{\text{сек}}$	ϵ , %	δ , $\frac{\text{мм}}{\text{сек}}$	Δ , $\frac{\text{мм}}{\text{сек}}$	$H_{\text{Я}}$, кэ	f_S	f_A
Формула	Температура, °К	Формула	Температура, °К							
ZnO [5]	4,2	MgO (Ga)	4,2	$0,6 \cdot 10^{-3}$	—	-0,021	—	—	—	—
	4,2	ZnO	4,2	—	0,2	0	—	—	—	—
Ge	77	Ge (кул. возб.)	77	4,4	0,64	+0,11	—	—	0,01	—
Ru	88	Ru (Rh)	85	0,37	4 ₀	—	—	—	0,14	—
Sn	77	Sn	77	0,6	—	—	—	—	0,29	—
	77	SnO ₂	77	1,4	—	+2,55	—	—	—	—
	300	Mg ₂ Sn	300	—	—	0,68	0	—	—	—
SnO	83	Sn	83	2	—	0,09	2	—	—	—
SnO ₂	—	Sn	—	1,3	7,6	+2,6	—	—	—	—
	300	SnO ₂	300	1,4	31	—	—	—	0,70	—
	—	Mg ₂ Sn	—	—	—	-1,9	0,50	—	—	—
Mg ₂ Sn	300	Mg ₂ Sn	300	1,0	5	—	—	—	—	—
Te	4,2	Te	4,2	5,2	25	—	7,8	—	—	—
TeO ₂	300	TeO ₂	77	5,2	—	—	—	—	0,12	0,07
Na ₂ H ₂ ¹²⁷ IO ₆	20	ZnTe	20	4,1	—	+1,6	—	—	—	—
¹²⁹ I ₂	100	ZnTe	120	0,87	—	+0,82	—	—	—	—
Na ¹²⁹ I	77	ZnTe	77	—	—	-0,46	—	—	0,15	0,29
¹²⁹ XeF ₂	—	NaI	4,2	21	2	0	42	—	—	—
	—	NaI	4,2	9	2	0	42	—	—	—
Na ¹²⁹ XeO ₆	4,2	NaI	4,2	13	5,4	-0,3	—	—	—	—
¹³¹ XeF ₄	—	Na ₂ H ₃ IO ₆	—	6,8	—	—	6,0	—	—	—
CsCl	—	BaCl ₂ ·2H ₂ O	4,2	1,1	0,3 ₀	-0,01	—	—	—	—
Sm ₂ O ₃	—	Eu ₂ O ₃	—	4	—	—	—	—	—	—
¹⁵¹ Eu	4	Eu ₂ O ₃ (Gd)	4	—	—	-8,1	—	—	—	—
¹⁵¹ Eu ₂ O ₃	77	Eu ₂ O ₃ (Gd)	77	—	25	—	—	—	0,54	0,54
¹⁵⁵ Gd ₂ O ₃ (E_{γ} = 60 кэв)	80	Sm ₂ O ₃ (Eu)	80	4,3	—	—	—	—	—	—
Gd ₂ O ₃ (E_{γ} = 86,5 кэв)	80	Sm ₂ O ₃ (Eu)	80	1,1	0,5 ₆	—	—	—	0,012	0,012
Tb ₄ O ₇	80	Dy ₂ O ₃	80	80	2	—	—	—	—	—
¹⁶¹ Dy ₂ O ₃	300	Dy ₂ O ₃	300	12	—	—	—	—	0,10	—
	—	Gd ₂ O ₃ (Tb)	300	13	6	—	—	—	0,23	—
¹⁶⁶ Er ₂ O ₃	20	Ho ₂ O ₃	20	2	21 ₀	0	—	—	—	—
Tm	—	Er ₂ O ₃	800	30	—	+5	144	7000	—	—
	—	Er ₂ O ₃	—	2,5	—	—	—	—	—	—
Tm ₂ O ₃	—	Er ₂ O ₃	300	14	4	—	—	—	—	—
¹⁷⁰ Yb ₂ O ₃	20	Tm	20	—	3,5	+5,7	—	—	—	—
¹⁷¹ Yb ₂ O ₃	4,2	Er ₂ O ₃ (Tm)	4,2	11	10	—	11	—	—	—
Hf ₂ O ₃	—	Lu ₂ O ₃	—	11	—	—	—	—	0,11	0,04
Ta	—	W	300	0,26	4,5	+0,9	—	—	—	—
TaC	300	W	300	0,06	0,6	—	—	—	—	—
¹⁸² W	22	Ta	22	2,0	44 ₀	+1,3	—	—	—	—
¹⁸² W ₂ O ₃	77	Ta	77	—	—	—	—	—	—	—
¹⁸³ W	300	Ta	300	40	4,4	+0,17	—	—	—	—
¹⁸⁴ WCl ₆	4,2	W (Re)	4,2	—	—	-0,10	—	—	—	—
¹⁸⁶ W	4,2	Re	4,2	4,26	—	—	—	—	—	—
¹⁸⁶ Os	10	Re	10	3,3	74	—	—	—	—	—
¹⁸⁸ Os	15	Re	15	7,5	23 ₀	—	—	—	0,02	0,11
¹⁹¹ Ir	91	Os	91	29	1,1	—	—	—	0,07	—
	4	Os	4	22	—	—	—	—	—	—
¹⁹³ Ir	4,2	Os	4,2	—	—	+0,6	—	—	—	—
Pt	20	Pt (Au)	20	—	4	—	—	—	—	0,13
	—	Cu (Au)	4,2	20	4	—	—	—	—	—
Au	4,2	Pt	4,2	6	8 ₀	-1,2	—	—	0,34	0,14
UO ₂ [6]	4,2	PuO ₂	4,2	45	—	0	—	2700	—	—
	77	PuO ₂	77	48	4	0	—	—	—	—

Таблица 38.3

Изомерный сдвиг δ некоторых веществ
относительно металлического железа при
температуре 300°K [4]

Вещество	δ , мм/сек	Вещество	δ , мм/сек
Au	-0,632	Mo	-0,060
In	-0,550	Ta	-0,033
Zn	-0,527	Fe	0,0
Ag	-0,525	Nb	+0,015
Pt	-0,347	$K_4Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$	+0,045
Cu	-0,226	Нерж. сталь	+0,090
Ir	-0,225	Ti	+0,108
Pd	-0,185	Cr	+0,152
Be	-0,120	V	+0,198
Rh	-0,114	$Na_2[Fe(CN)_5NO] \cdot 2H_2O$	+0,257

1. Физический энциклопедический словарь. М., «Советская энциклопедия», 1963, с. 183.
2. Mössbauer Effect. Principles and Applications. Wertgein G. K. Acad. Press. N. Y.—Lond., 1964.
Вертхейм Г. Эффект Мёссбауэра. Пер. с англ. Под ред. В. В. Скляревского. М., «Мир», 1966.
3. Шпинель В. С. Резонанс гамма-лучей в кристаллах. М., «Мир», 1969.
4. Muir A. H., Ando K. J., Coogan H. M. Mössbauer Effect Data Index 1958—1965. Inter science Publ. New York — London — Sydney, 1966.
5. Бескровный А. И., Лебедь Н. А., Останевич Ю. М. В кн. «Proceedings of the Conf. on Mössbauer Spectrometry», Dresden, 1971, v. 2, p. 583.
6. Ruby S. L. e. a. «Phys. Rev.», 1969, v. 184, p. 374.

ГЛАВА 39

РЕАКЦИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕЙТРОНОВ

39.1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЙТРОНА

Масса покоя [1]	$1,6749543(86) \cdot 10^{-24} \text{ г} =$ $= 1,008665012(37) \text{ а. е. м.}$
Заряд	$< 10^{-18}$ заряда электрона [2].
Распад [3]	$n_0^1 \rightarrow p^+ + e^- + \nu^*$, $T_{1/2} = (11,7 \pm 0,3) \text{ мин.}$
Верхняя граница энергии β -частиц	$(782 \pm 13) \text{ кэВ}$ [3].
Спин	$\pm 1/2$.

Собственная энергия
нейтрона 939,5 Мэв.
Магнитный момент [4]:

$$\mu_n = (-1,913148 \pm 0,000066) \mu_N,$$

где $\mu_N = (0,5050824(20) \cdot 10^{-23} \text{ эрг/гс})$ — ядерный магнетон.

Электрический дипольный момент нейтрона меньше, чем дипольный момент системы, состоящей из двух электронных зарядов, разделенных расстоянием в $5 \cdot 10^{-21} \text{ см}$ [4].

Длины волн, соответствующие различным энергиям нейтронов

Таблица 39.1

Группа нейтронов	E , эв	T , °K	v , см/сек	λ , см
Холодные	$E < 0,01 \text{ эв}$	0,001	4,37 · 10 ⁴	9,04 · 10 ⁻⁸
Тепловые	$E \approx 0,01 \div 0,1 \text{ эв}$	0,0252	2,198 · 10 ⁵	1,80 · 10 ⁻⁸
Резонансные	$E \approx 0,1 \div 50 \text{ эв}$	1,0	1,38 · 10 ⁶	2,86 · 10 ⁻⁹
Медленные	$E \approx 50 \div 500 \text{ эв}$	100	1,38 · 10 ⁷	2,86 · 10 ⁻¹⁰
Промежуточных энергий	$E \approx 500 \div 10^5 \text{ эв}$	10 ⁴	1,38 · 10 ⁸	2,86 · 10 ⁻¹¹
Быстрые	$E \approx 10^5 \div 10^7 \text{ эв}$	10 ⁶	1,38 · 10 ⁹	2,86 · 10 ⁻¹²
Очень больших энергий	$E \approx 10^7 \div 10^9 \text{ эв}$	10 ⁸	1,28 · 10 ¹⁰	2,79 · 10 ⁻¹³
Релятивистские	$E > 10^9 \text{ эв}$	10 ¹⁰	2,99 · 10 ¹⁰	1,14 · 10 ⁻¹⁴

39.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОГОВЫХ РЕАКЦИЙ. ЭНЕРГИИ ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ ЯДЕР

Характеристики пороговых реакций. В ядерной реакции $A_1 + A_2 \rightarrow A_3 + A_4 + Q$, когда две начальные частицы A_1 и A_2 превращаются в две конечные частицы A_3 и A_4 , тепловой эффект реакции или энергетический выход Q определяется массами m_1, m_2 ,

m_3, m_4 частиц, участвующих в реакции:

$$Q = (m_1 + m_2 - m_3 - m_4) c^2,$$

где c — скорость света в вакууме. Если Q — отрицательная величина, то в лабораторной системе координат (L -система), где частица A_2 покоится, реакция протекает лишь тогда, когда кинетическая энергия W_1 падающей частицы A_1 больше энергии порога реакции E_n :

$$E_n = |Q| \frac{m_1 + m_2}{m_2}.$$

При учете релятивистских эффектов:

$$E_{\pi} \approx |Q| \left(\frac{m_1 + m_2}{m_2} + \frac{1}{2} \frac{|Q|}{m_2 c^2} \right).$$

В лабораторной системе координат кинетические энергии W_3 и W_4 частиц продуктов реакции, вылетающих под углами θ_3 и θ_4 к направлению падающей частицы A_1 , определяются формулами

$$W_3 = \frac{1}{M^2} \{ \sqrt{m_1 m_3 W_1} \cos \theta_3 \pm [m_1 m_3 W_1 \cos^2 \theta_3 + M(m_4 Q + (m_4 - m_1) W_1)]^{1/2} \}^2,$$

где $M = m_3 + m_4$. Выражение для W_4 получается из предыдущего перестановкой индексов 3 и 4. Углы вылета θ_3 в θ_4 ограничены условиями:

$$\sin^2 \theta_3 \leq \frac{m_4}{m_3} \left\{ \frac{M}{m_1} \left[1 - \frac{|Q|}{W_1} \right] - 1 \right\};$$

$$\sin^2 \theta_4 \leq \frac{m_3}{m_4} \left\{ \frac{M}{m_1} \left[1 - \frac{|Q|}{W_1} \right] - 1 \right\}.$$

Тепловой эффект реакции Q может быть найден по значению кинетической энергии частицы W_3 и углу вылета θ_3 :

$$Q = \frac{M}{m_4} W_3 - \frac{m_4 - m_1}{m_4} W_1 - \frac{2 \sqrt{m_1 m_3 W_1 W_3}}{m_4} \cos \theta_3.$$

Таблица 39.2

Энергии первого E_1 и второго E_2 возбужденных состояний ядер некоторых изотопов [5,6]

Ядро	E_1 , Мэв	E_2 , Мэв	Ядро	E_1 , Мэв	E_2 , Мэв
^2D , ^4He	Нет	Нет	^{14}N	2,31	3,95
^6Li	2,19	3,57	^{16}O	6,06	6,13
^7Li	0,479	4,63	^{18}O	1,98	2,45
^9Be	1,70	2,43	^{19}F	0,11	0,20
^{10}B	0,717	1,74	^{23}Na	0,44	2,08
^{11}B	2,14	4,46	^{24}Na	1,37	4,12
^{12}C	4,44	7,66	^{25}Mg	0,584	0,976
	3,09	3,68	^{26}Mg	1,81	2,94

Продолжение табл. 39.2

Ядро	E_1 , Мэв	E_2 , Мэв	Ядро	E_1 , Мэв	E_2 , Мэв
^{27}Al	0,842	1,013	^{107}Ag	0,093	0,126
^{28}Si	1,772	4,61	^{109}Ag	0,083	0,129
^{31}P	1,265	2,232	^{110}Cd	0,656	1,38
^{32}S	2,24	3,78	^{112}Cd	0,615	1,23
^{35}Cl	1,22	1,762	^{114}Cd	0,556	1,278
^{37}Cl	0,84	1,73	^{115}In	0,335	0,595
^{39}K	2,53	2,82	^{116}Sn	1,29	2,12
^{40}Ca	3,351	3,73	^{118}Sn	1,22	1,75
^{44}Ca	1,158	1,883	^{120}Sn	1,18	2,215
^{46}Ti	0,892	2,01	^{121}Sb	0,506	0,573
^{48}Ti	0,99	2,31	^{127}I	0,058	0,203
^{51}V	0,323	0,928	^{138}Ba	1,43	1,89
^{52}Cr	1,46	2,43	^{181}Ta	0,136	0,152
^{55}Mn	0,13	0,98	^{182}W	0,101	0,329
^{56}Fe	0,845	2,08	^{183}W	0,046	0,099
^{57}Fe	0,13	0,35	^{184}W	0,11	0,35
^{58}Fe	0,8	1,6	^{186}W	0,126	0,730
^{59}Co	1,098	1,289	^{194}Pt	0,328	0,621
^{60}Ni	1,45	2,45	^{195}Pt	0,099	0,130
^{60}Ni	1,33	2,16	^{196}Pt	0,354	0,685
^{63}Cu	0,668	0,961	^{197}Au	0,077	0,268
^{65}Cu	0,770	1,12	^{199}Hg	0,158	0,208
^{64}Zn	0,980	2,25	^{200}Hg	0,368	0,947
^{65}Zn	0,054	0,118	^{206}Pb	0,803	1,341
^{67}Zn	1,04	2,4	^{207}Pb	0,569	0,894
^{70}Ge	1,036	1,21	^{208}Pb	2,62	3,20
^{72}Ge	0,69	0,84	^{209}Bi	0,90	1,62
^{74}Ge	0,596	1,25	^{230}Th	0,053	0,174
^{76}As	0,199	0,265	^{232}Th	0,049	0,163
^{76}Se	0,55	1,2	^{238}U	0,0404	0,092
^{88}Sr	1,85	2,76	^{235}U	0,007	0,013
^{89}Y	0,913	1,53	^{236}U	0,046	0,151
^{90}Zr	1,77	2,2	^{238}U	0,045	0,148
^{92}Zr	0,93	1,83	^{239}Pu	0,008	0,057
^{93}Nb	0,029	0,765	^{240}Pu	0,043	0,142
^{95}Mo	0,201	0,762	^{241}Pu	0,044	0,080
^{96}Mo	0,770	1,61			

39.3. РЕАКЦИИ (n, γ)

Таблица 39.3

Спектр γ -квантов, испускаемых при поглощении тепловых нейтронов различными ядрами [5]

Исходное ядро	Число фотонов с энергией E , Мэв, на 100 поглощенных нейтронов							Наибольшая энергия γ -квантов, Мэв
	$E = 0+1$	$E = 1+2$	$E = 2+3$	$E = 3+5$	$E = 5+7$	$E = 7+9$	$E > 9$	
H	0	0	100	0	0	0	0	2,23
D	0	0	0	0	100	0	0	6,24
Li	—	—	—	—	40	60	0	7,26
Be	0	0	0	54	73	0	0	6,80
^{10}B	0	0	0	110	28	60	0,8	11,43
^{14}N	0	0	0	100	0	0	0	4,95
O	—	—	—	54	11	15	12	10,83
Ne	—	100	—	—	111	0	0	6,60

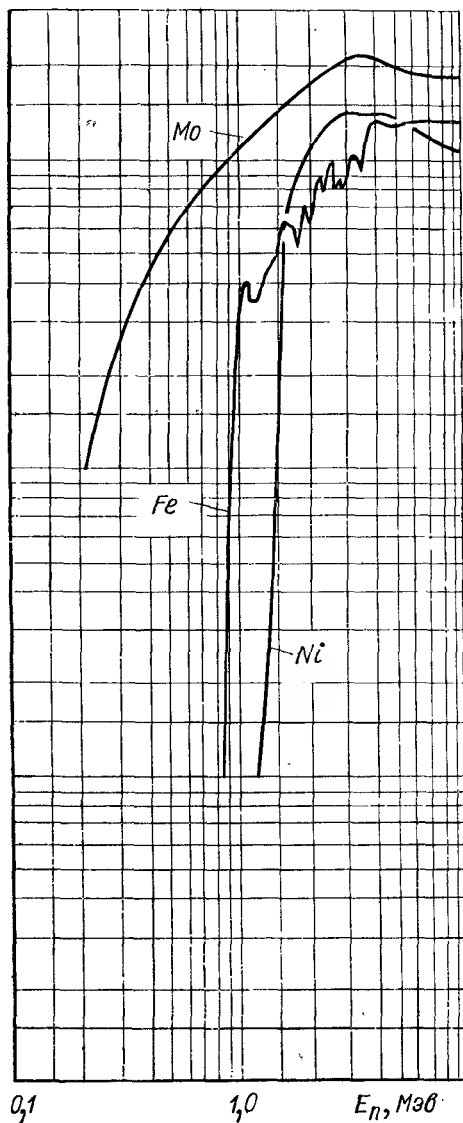
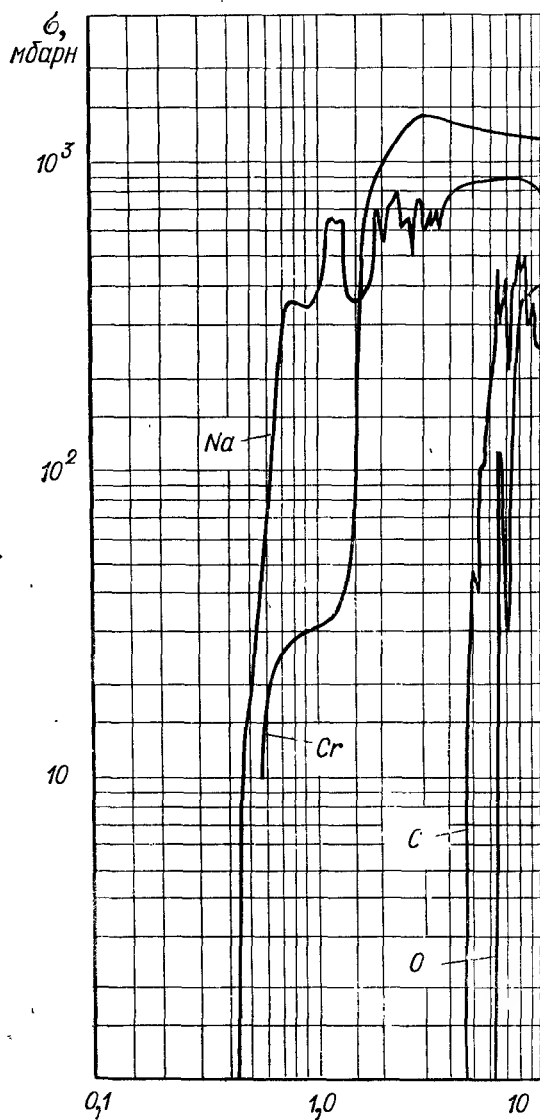
Исходное ядро	Число фотонов с энергией E , Мэв, на 100 поглощенных нейтронов							Наибольшая энергия γ -квантов, Мэв
	$E = 0 \div 1$	$E = 1 \div 2$	$E = 2 \div 3$	$E = 3 \div 5$	$E = 5 \div 7$	$E = 7 \div 9$	$E > 9$	
Na	96	127	187	70	31	0	0	6,41
Mg	—	—	28	72	10	3,3	0,57	11,09
Al	236	195	69	62	19	19	0	7,724
Si	100	63	30	89	11	41	0,1	10,59
P	290	97	55	98	27	7,2	0	7,94
S	70	32	72	70	44	6,5	0	8,64
Cl	49	85	41	47	55	24	0	8,55
K	100	81	57	106	37	4,7	0	9,36
Ca	14	191	77	85	64	1,8	0	7,83
Sc	52	59	38	65	29	12	0	8,85
Ti	54	160	16,0	24	78	1,3	0,2	10,47
V	83	132	11,4	21	67	16	0	7,98
Cr	85	41	21	12	23	39	6,4	9,716
Mn	125	91	60	50	34	17	0	7,261
Fe	75	60	27	23	25	38	2,1	10,16
Co	61	26	17	42	52	8,5	0	7,486
Ni	84	40	23	23	34	62	0,8	8,997
Cu	68	47	26	30	27	43	0	7,914
Zn	156	93	67	48	29	16	1	9,51
Ga	—	—	—	57	34	0,2	0	7,73
As	—	—	—	47	22	1	0	7,30
Se	—	—	—	65	27	9	1,7	10,483
Br	—	—	—	79	41	6,4	0	7,879
Sr	—	—	—	69	51	14	0,1	9,22
Y	71	23	6	50	59	0	0	6,85
Zr	—	—	—	113	35	4	0	8,66
Nb	—	—	—	54	14	0,4	0	7,19
Mo	137	18	—	84	26	3	0,03	9,15
Rh	91	99	61	38	10	0	0	6,792
Ag	92	87	64	70	17	0,5	0	7,27
Cd	135	92	96	73	17	1	0,1	9,046
In	102	197	78	36	4	0	0	5,86
Sn	216	153	67	139	33	4	0,4	9,35
Sb	150	99	58	36	12	0	0	6,80
Te	58	—	—	—	—	—	—	—
I	30	—	—	97	22	0	0	6,71
Cs	46	—	—	61	25	0	0	6,702
Ba	—	—	—	75	14	1,4	0,1	9,23
La	21,7	8,2	—	35	12,5	0	0	5,045
Pr	—	—	—	34	8	0	0	5,83
Nd	105	—	—	—	—	—	—	—
Sm	167	150	109	45	5	1	0	7,89
Eu	106	153	109	56	6,5	0	0	6,05
Ga	194	117	100	23	34	0,3	0	7,33
Tb	7	—	—	—	—	—	—	—
Dy	90	102	106	43	10	0	0	5,87
Ho	—	98	77	49	8	0	0	6,1
Er	225	145	133	103	14	0	0	6,68
Tm	—	91	73	55	10	0	0	6,5
Hf	137	137	85	52	12	0,5	0	7,62
Ta	137	99	66	55	5	0	0	6,04
W	68	82	59	53	15	0,5	0	7,42
Re	124	88	62	51	10,5	0	0	6,14
Ir	98	85	58	51	19,6	0	0	6,088
Pt	109	92	64	45	15	1	0	7,92
Au	100	69	33	68	38	0,1	0	6,494
Hg	94	122	55	86	41	0	0	6,446
Tl	—	—	—	76	62	0	0	6,54
Pb	0	0	0	0	7	93	0	7,38
Bi	0	0	0	100	0	0	0	4,17
²³² Th	118	140	64	17	0	0	0	4,92
²³⁸ U	254	178	91	34	0	0	0	4,062

Сечения реакции (n, γ) в тепловой области для некоторых ядер [6]

Мишень	σ , барн	Мишень	σ , барн
^{113}Cd	21000	^{165}Dy	5000
^{135}Xe	$2,7 \cdot 10^6$	^{168}Yb	11000
^{149}Sm	$6 \cdot 10^4$	^{176}Lu	4000
^{151}Sm	9000	^{174}Hf	1500
^{151}Eu	9000	^{191}Ir	1000
^{152}Eu	5500	^{198}Au	35000
^{154}Eu	1000	^{196}Hg	3000
^{155}Eu	14000	^{199}Hg	2500
^{155}Gd	$7 \cdot 10^4$	^{233}Th	1400
^{157}Gd	$1,6 \cdot 10^6$	^{235}Cl	1500
^{164}Dy	2600	^{251}Cl	3000

При неупругом рассеянии захват ядром $^A_Z N$ нейтрона приводит к образованию составного ядра $^{A+1}_Z N$, которое впоследствии испускает нейтрон с меньшей энергией, чем первоначальный. После эмиссии нейтрона ядро остается в возбужденном состоянии, переход из которого на основное состояние возможен путем испускания одного или нескольких γ -квантов. Неупругое рассеяние нейтронов возможно только в том случае, если энергия нейтрона в $(A+1)/A$ раз превышает энергию первого (нижнего) возбужденного состояния ядра-мишени. Как правило, энергия порога с увеличением массового числа A уменьшается.

Неупругое рассеяние не может быть полностью описано единственным сечением. Если кинетическая энергия нейтрона E достаточна для возбуждения нескольких уровней, то возбуждение каждого из них может

Рис. 39.1. Зависимость сечения неупругого рассеяния нейтронов $\sigma(n, n')$ для различных ядер от энергии нейтронов E_n [11].

Интегральные сечения неупругого рассеяния

$$\sigma_{in}(n, n')$$

Представлены сечения неупругого рассеяния нейтронов, отвечающие случаям, при которых нейтрон с начальной энергией E имеет после рассеяния энергию меньшую, чем граничная энергия $E_{гр}$ [7]. Обозначения: $E \rightarrow E_{гр}$ — минимальный сброс энергии; сп. дел. — спектр деления.

Элемент	$E \rightarrow E_{гр}, \text{ Мэв}$	$\sigma_{in}(n, n'), \text{ барн}$	Элемент	$E \rightarrow E_{гр}, \text{ Мэв}$	$\sigma_{in}(n, n'), \text{ барн}$
Be	14→3	0,16±0,07	Zr	Сп. дел.→0,7	0,302±0,050
B	14→3	0,24±0,04	Sp.	дел.→0,7	0,840±0,105
C	14→3	0,28±0,04	Cd	Сп. дел.→0,7	0,658±0,079
N	14→3	0,46±0,05	14→3	0,66±0,07	
Al	14→3	0,62±0,07	Sn	Сп. дел.→0,7	0,369±0,050
Ti	Сп. дел.→0,7	0,087±0,032	W	Сп. дел.→0,7	1,080±0,145
V	Сп. дел.→0,7	0,187±0,057	3→1,5	2,4	
Fe	Сп. дел.→0,7	0,224±0,046	Au	14→3	2,06±0,09
Ni	14→3	1,21±0,03	Pb	Сп. дел.→0,7	1,00±0,12
Cu	Сп. дел.→0,7	0,276±0,031	14→3	2,29±0,04	
Ni	Сп. дел.→0,7	0,276±0,041	Сп. дел.→0,7	0,208±0,05	
Cu	Сп. дел.→0,7	0,304±0,043	2,5→1	0,55	
Zn	14→3	1,32±0,05	Bi	14→3	2,28±0,08
As	Сп. дел.→0,7	0,305±0,047	Сп. дел.→0,7	0,197±0,035	
	Сп. дел.→0,7	1,67			

Таблица 39.6

Пороги реакции (n, 2n) для различных изотопов [2]

Мишень	A	Энергия порога, Мэв	Мишень	A	Энергия порога, Мэв	Мишень	A	Энергия порога, Мэв
H	2	3,34	Fe	54	14,1	In	115	9,1
	3	8,33		56	11,3	Sn	118	9,2
Li	6	6,2		57	7,9		119	6,6
	7	8,2	Co	59	10,5		124	8,6
Be	9	1,85	Ni	58	11,9	Sb	121	9,3
B	10	9,4		61	7,6		123	9,4
	11	12,6	Cu	63	11,1	Te	—	6,6
C	12	20,3		65	10,2	I	127	9,4
N	14	11,3	Zn	64	11,9	Cs	133	9,1
O	16	17,3		66	11,3	Ba	—	6,8
F	19	10,9		67	7,1	La	139	8,9
Na	23	12,6		68	10,3	Ce	140	9,1
Mg	24	17,1		70	9,3		142	7,2
	25	7,5	Ga	69	10,2	Pr	141	9,5
	26	11,6		71	9,2	Nd	150	7,4
Al	27	13,2	As	75	10,4	Ta	181	7,6
Si	28	17,4	Se	82	9,9	W	—	6,3
	29	8,7	Br	79	10,9	Re	187	7,3
P	31	12,6		81	10,3	Ir	193	7,8
S	32	15,3	Sr	86	9,6	Pt	194	9,5
	34	11,2		87	8,5		195	6,1
Cl	—	10,2		88	11,2		196	8,2
K	39	13,5	Zr	90	12,6	Au	197	8,1
Ca	40	16,3		91	7,3	Hg	201	6,3
Ti	46	13,6	Nb	93	8,8	Tl	203	8,8
	48	11,8	Mo	92	13,4		205	7,5
	49	8,9		97	7,2	Pb	206	8,3
V	51	11,4	Ru	—	7,1		207	6,9
Cr	50	13,7	Rh	103	9,4		208	7,4
	52	12,0	Pd	—	7,1	Bi	209	7,4
	53	7,9	Ag	109	9,1	Th	232	6,4
Mn	55	10,3	Cd	113	6,6	U	238	6,0

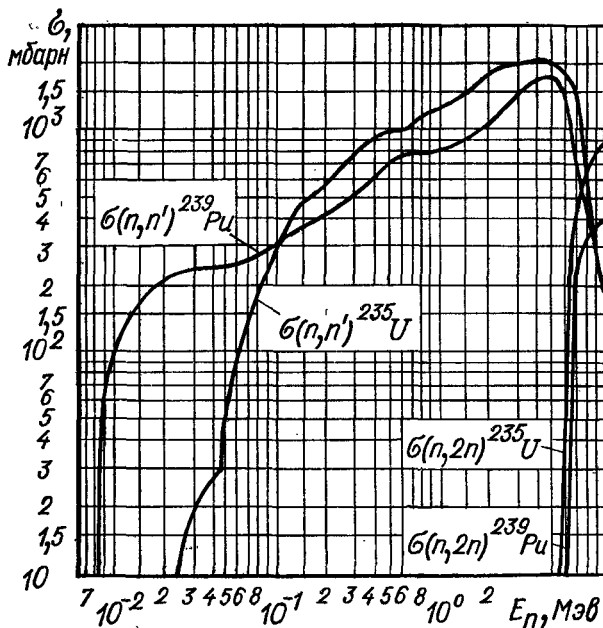


Рис. 39.2. Зависимость сечения σ неупругого рассеяния (n, n') и реакции ($n, 2n$) для ^{235}U и ^{239}Pu от энергии нейтронов E_n [11].

происходить со своим собственным значением сечения $\sigma(E \rightarrow \varepsilon)$; здесь ε — энергия нейтрона после рассеяния. Однако измерения дифференциального сечения $\sigma(E \rightarrow \varepsilon)$ достаточно сложны, поэтому часто приводятся интегральные сечения неупругого рассеяния $\sigma_{in}(E)$, которые представляют собой вероятность того, что нейтрон потеряет какое-то количество энергии помимо потери, обусловленной отдачей ядра мишени.

39.5. РЕАКЦИИ ($n, 2n$)

Если энергия нейтрона на несколько мегаэлектрон-вольт превышает порог реакции ($n, 2n$), то эта реакция, как правило, идет с большой вероятностью. Сечение реакции ($n, 2n$) может быть оценено по формуле [4]:

$$\sigma(n, 2n) = \sigma(n, n) [1 - (1 + \varepsilon/T) e^{-\varepsilon/T}],$$

где $\sigma(n, n) \approx \pi R^2$ — сечение первичного испускания нейтрона; R — радиус ядра; ε — разница энергий налетающего нейтрона и порога реакции; T — температура остаточного ядра. Тяжелые элементы имеют температуру остаточного ядра $T \sim 1 \text{ Мэв}$, а легкие ядра несколько больше.

Таблица 39.7

Сечения реакции ($n, 2n$) [5]

Ядро	Энергия нейтронов, Мэв	$\sigma(n, 2n)$, мбарн
^2H	6,11 6,55 7,32 8,26 10,2 14,1	67 ± 7 73 ± 7 88 ± 9 110 ± 10 140 ± 15 190 ± 200
^4He	90	$16 \pm 1,6$
^6Li	14	≤ 100
^9Be	Сп. дел. Ро- α -Be	73 ± 20 310 ± 50
B	14,1	180 ± 2
C	14,1 23 27	8 ± 6 44 100
N	12,41 14,1 14,7 17,98 Li + D	$3,03 \pm 0,75$ 15 ± 4 $8,7 \pm 0,9$ $11,5 \pm 1,2$ 1,9
F	$E_{\text{макс}} = 13,8$ 14,1	56 ± 7
Na	14,1	$13,8 \pm 2,2$
P	14,4	$10,9 \pm 8,5$
Cl	17,98	$74 \pm 7,4$
^{39}K	14,4	$5,42 \pm 0,4$
Sc	14,4 Li + D	$3,37 \pm 0,27$ 39
Ti	14,1	520 ± 40
V	14,1	660 ± 50
^{52}Cr	14	$32 \pm 3,2$
Mn	Сп. дел. 14,1	1,5 900 ± 70
Fe	14 14,1	180 ± 30 500 ± 40
Co	14,1	870 ± 70
^{58}Ni	Сп. дел. 13,52 14,09 16,50 19,76	$1,2 \cdot 10^{-3}$ 13 ± 7 [8] $23,5 \pm 1,2$ [8] $53,3 \pm 4,3$ [8] $77,4 \pm 3,9$ [8]
^{63}Cu	Li + D 12,41	314 186 ± 19 [9]

Продолжение табл. 39.7

Ядро	Энергия нейтронов, Мэв	$\sigma(n, 2n)$, мбарн
^{65}Cu	14,74 17,98 12,06 14,09 16,50 19,76	507 ± 45 [9] 836 ± 75 [9] 504 ± 25 [10] 906 ± 36 [10] 997 ± 56 [10] 986 ± 49 [10]
Zn	Li + D 14	~ 190 330 ± 60
^{69}Ga	14,8	1070 ± 110
^{71}Ga	14,5	2180 ± 220
^{70}Ge	Сп. дел. Li + D	1,5 369
^{82}Se	14,8	1500 ± 500
^{79}Br	14,5	1140 ± 300
^{81}Br	14,5	828 ± 170
Zr	14,1	1250 ± 90
Mo	14,1	1590 ± 120
Ag	14	770 ± 80
Cd	14	890 ± 20
^{115}In	13,3 19,76	1428 ± 71 1360 ± 140
Sn	14	1040 ± 20
Sb	14	1520 ± 200
^{130}Te	14,5	599 ± 120
I	14,5	1120 ± 400
Cs	14	1600 ± 250
Pr	14,4	1801 ± 130
Nd	14,4	2410 ± 200
Ta	14,1	2640 ± 200
^{187}Re	14,8	1675 ± 170
Au	14,1	2600 ± 200
Hg	14	1900 ± 300
Pb	14	2300 ± 190
Bi	14,1	2710 ± 200
U	Сп. дел.	2600 ± 190
^{237}Np	14,5	$11,7 \pm 3$ 390

Таблица 39.8

Реакции на медленных нейтронах с образованием заряженных частиц [4, 6]

Реакция	σ (кТ), барн
$^3\text{He} + n \rightarrow ^3\text{H} + p + 0,764 \text{ Мэв}$	5400
$^6\text{Li} + n \rightarrow ^3\text{H} + \alpha + 4,785 \text{ Мэв}$	945
$^7\text{Be} + n \rightarrow ^7\text{Li} + p + 1,65 \text{ Мэв}$	51000
$^{10}\text{B} + n \rightarrow ^7\text{Li} + \alpha + 2,791 \text{ Мэв}$	3837
$^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{14}\text{C} + p + 0,626 \text{ Мэв}$	1,75
$^{17}\text{O} + n \rightarrow ^{14}\text{C} + \alpha + 1,72 \text{ Мэв}$	0,5
$^{33}\text{S} + n \rightarrow ^{33}\text{P} + p + 0,75 \text{ Мэв}$	0,002
$^{35}\text{Cl} + n \rightarrow ^{35}\text{S} + p + 0,62 \text{ Мэв}$	0,3
$^{23}\text{Na} + n \rightarrow ^{23}\text{Ne} + p$	0,0007*
$^{24}\text{Mg} + n \rightarrow ^{24}\text{Na} + p - 4,734 \text{ Мэв}$	0,001*
$^{27}\text{Al} + n \rightarrow ^{27}\text{Mg} + p - 1,835 \text{ Мэв}$	0,0028*
$^{28}\text{Si} + n \rightarrow ^{28}\text{Al} + p - 3,857 \text{ Мэв}$	0,004*
$^{31}\text{P} + n \rightarrow ^{31}\text{Si} + p - 0,694 \text{ Мэв}$	0,019*
$^{37}\text{Cl} + n \rightarrow ^{36}\text{S} + p$	0,00024*
$^{54}\text{Fe} + n \rightarrow ^{54}\text{Mn} + p - 2,93 \text{ Мэв}$	0,011*

* Для нейтронов спектра деления.

39.6. РЕАКЦИИ С ИСПУСКАНИЕМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Из составного ядра, образованного при поглощении нейтрона, могут испускаться заряженные частицы, если энергия возбуждения составного ядра была достаточна для того, чтобы заряженная частица имела заметную вероятность проникновения через кулоновский барьер. Реакции с испусканием заряженной частицы на медленных нейтронах обычно экзотермичны, поскольку медленный нейтрон не может сообщить ядру энергию, необходимую для испускания заряженной частицы из ядра.

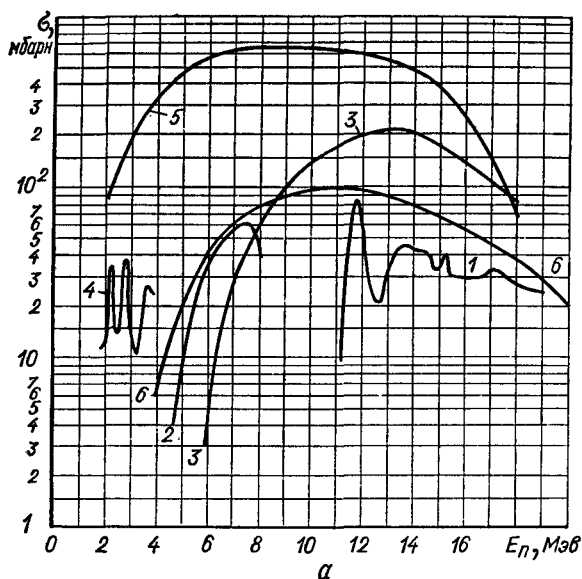
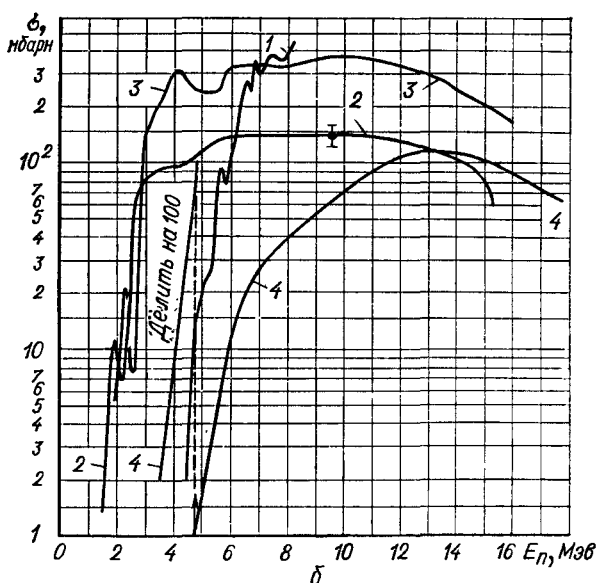


Рис. 39.3. Зависимость сечения σ реакции (n, p) для различных ядер от энергии нейтронов E_n :
 α : 1 — $^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$ [12]; 2 — $^{18}\text{F}(n, p)^{18}\text{O}$ [27];
 3 — $^{24}\text{Mg}(n, p)^{24}\text{Na}$ [25, 13]; 4 — $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ [4];



5 — $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$ [25]; 6 — $^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$ [25];
 δ : 1 — $^{28}\text{Si}(n, p)^{28}\text{Al}$ [14]; 2 — $^{31}\text{P}(n, p)^{31}\text{Si}$ [25, 15];
 3 — $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ [25, 16]; 4 — $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ [25, 17].

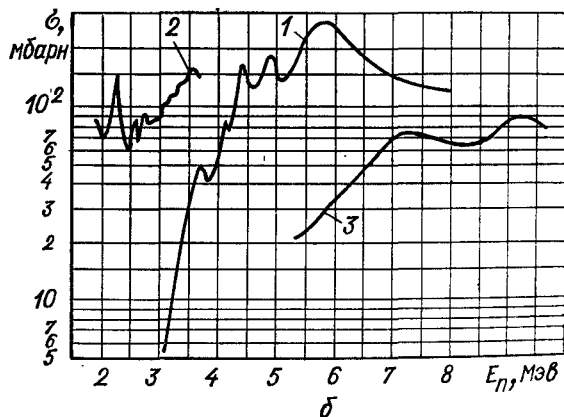
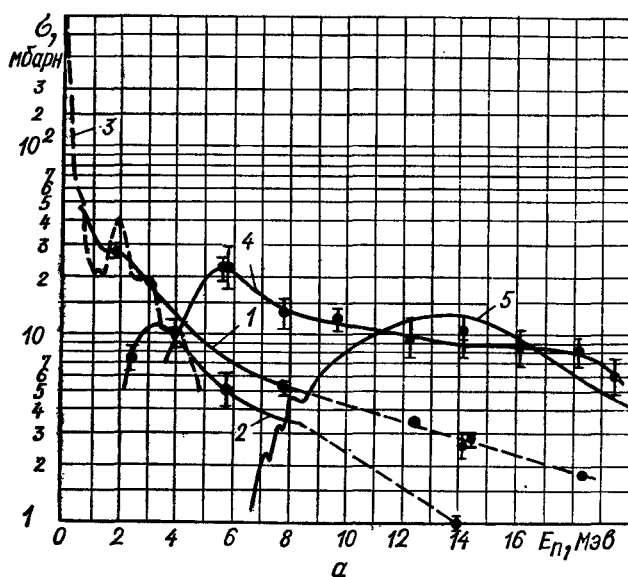


Рис. 39.4. Зависимость сечения σ для различных реакций и ядер от энергии нейтронов E_n :
 α : 1 — $^6\text{Li}(n, p)^3\text{H}$ [26]; 2 — $^9\text{Be}(n, \alpha)^6\text{He}$ [18—20];
 3 — $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ [24]; 4 — $^{10}\text{B}(n, 2\alpha)^3\text{H}$ [21, 22];
 5 — $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ [15, 23, 25];
 δ : 1 — $^{18}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$ [27]; 2 — $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ [4];
 3 — $^{34}\text{S}(n, \alpha)^{31}\text{Si}$ [16].

39.7. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОГОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ НЕЙТРОНОВ

В табл. 39.9—39.11 приведены $E_n^{\text{эф}}$ — эффективный порог детектора нейтронов; E_n — пороговая энергия; $\bar{\sigma}$ — сечение реакции, усредненное по спектру деления

$N(E)$; σ_0 — сечение на «плато». Эти величины связаны соотношениями:

$$\int_0^{\infty} N_{\text{акт}}(E) dE = \sigma_0 \int_{E_n^{\text{эф}}}^{\infty} N(E) dE = \bar{\sigma} \int_0^{\infty} N(E) dE.$$

Характеристики пороговых детекторов, реакция (п. р) [25]

Т а б л и ц а 39.9

Элемент	Ядро-мишень (содержание нуклида, %)	Продукт реакции (период полураспада)	$E_{п'}$, Мэв	σ_0 , мбарн	$E_{п'}$, Мэв	σ , мбарн	Материал, из которого изгото- влен детектор	Вид радио- актив- ности	Побочные активности (по- роговая энергия, Мэв; период полураспада)
Фосфор	^{31}P (100)	^{31}Si (157 мин)	0,716	140	3,0	30	Фосфорсодер- жащее стекло	β^-	^{30}P (12,7; 2,6 мин) ^{28}Al (2,0; 2,3 мин) ^{29}Al (13,6; 6,6 мин) ^{32}P (тепловая энергия; 14,2 дня)
Сера	^{32}S (95)	^{32}P (14,2 дня)	0,954	350	3,2	66	Таблетки, со- держащие серу	β^-	^{33}P (8,7; 25 дней) ^{31}Si (1,32; 157 мин) ^{36}S (тепловая энергия; 87 дней)
Никель	^{58}Ni (68)	^{58}Co (72 дня)	—	600	3,45	100	Металличе- ский никель	γ , (э.з.*) β^+	^{57}Ni (12,0; 36 ч) ^{61}Co (0,5; 1,65 ч) ^{56}Ni (тепловая энергия; 2,56 ч)
Железо	^{54}Fe (5,82)	^{54}Mn (290 дней)	—	400	3,75	53	Металлическое железо	γ (э.з.)	^{51}Cr (27,8 дня) ^{56}Mn (2,95; 154,5 мин)
Алюми- ний	^{27}Al (100)	^{27}Mg (9,393 мин)	1,89	80	5,30	3,5	Металлический алюминий	γ , β^-	^{28}Al (тепловая энергия; 2,3 мин) ^{24}Na (3,26; 14,97 ч)
Железо	^{56}Fe (91,6)	^{56}Mn (154,5 мин)	2,95	130	7,70	0,97	Металлическое железо	γ , β^-	^{51}Cr (27,8 дня) ^{54}Mn (290 дней)
Магний	^{24}Mg (78,8)	^{24}Na 14,97 ч	4,9	200	8,00	1,2	Металлический магний	γ , β^-	—

* э.з. — электронный захват.

Характеристики пороговых детекторов, реакции (п. п'), (п. α) и (п. 2п) [25]

Т а б л и ц а 39.10

Элемент	Ядро-мишень (содержание нуклида, %) Тип реакции	Продукт реакции (период полураспада)	$E_{п'}$, Мэв	σ_0 , мбарн	$E_{п'}$, Мэв	σ , мбарн	Материал, из которого изгото- влен детектор	Вид радио- актив- ности	Побочные активности (пороговая энергия, Мэв; период полураспада)
Родий	^{103}Rh (100) (п, п')	^{103m}Rh (57 мин)	0,040	1500	0,9	1093	Металлический родий	γ , e^-	^{104m}Rh (тепловая энер- гия; 4,4 мин) ^{102}Rh (9,5; 210 дней)
Индий	^{115}In (95,8) (п, п')	^{115m}In (4,5 ч)	0,335	350	1,65	171	Металлический индий	γ , e^-	^{116m}In (тепловая энер- гия; 54,1 мин) ^{113m}In (0,393; 1,7 ч) ^{113}Ag (9,5; 5,3 ч) ^{112}Ag (3,4 ч)
Алюми- ний	^{27}Al (100) (п, α)	^{24}Na (14,97 ч)	3,26	120	8,15	0,61	Металлический алюминий	γ , β^-	^{27}Mg (1,89; 9,39 мин)
Медь	^{63}Cu (30,91) (п, 2п)	^{64}Cu (12,8 ч)	10,1	1000	11,7	0,31	Металлическая медь	γ , β^+ , β^-	^{61}Co (10,5; 1,65 ч) ^{65}Ni (2,56 ч) ^{64}Cu (тепловая энергия; 12,8 ч)
Медь	^{63}Cu (69,09) (п, 2п)	^{62}Cu (9,8 мин)	10,9	800	13,2	0,073	Металлическая медь	β^+	^{60m}Co (10,5 мин) ^{66}Cu (тепловая энергия; 5,1 мин) ^{62}Co (13,9 мин) ^{65}Ni (2,56 ч) ^{61}Co (1,65 ч)
Никель	^{58}Ni (68,0) (п, 2п)	^{57}Ni (37 ч)	12,0	80	14	$4 \cdot 10^{-3}$	Металлический никель	γ , β^+	^{56}Ni (тепловая энергия; 2,56 ч) ^{61}Co (0,5; 1,65 ч)

Таблица 39.11

Характеристики пороговых детекторов деления [14]

Нуклид	$E_{п}, \text{ Мэв}$	$\sigma_0, \text{ мбарн}$	$E_{\Phi}, \text{ Мэв}$	$\bar{\sigma}, \text{ мбарн}$
^{234}U	$\sim 0,3$	1500	0,62	1200
^{237}Np	$\sim 0,4$	1500	0,87	1100
^{236}U	$\sim 0,7$	850	1,25	520
^{232}Th	$\sim 1,3$	140	1,40	28
^{238}U	$\sim 1,3$	606	1,55	310

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные формулы физики. Под ред. Д. Мензела. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1957.
2. Экспериментальная ядерная физика. Под ред. Э. Серге. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1955.
3. Сосновский А. И., Спивак П. Е. В кн.: «Физические исследования». М., Изд-во АН СССР, 1955, с. 235.
4. Кертис Л. Введение в нейтронную физику. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1965.
5. Гордеев И. В., Кардашев Д. А., Малышев А. В. Ядерно-физические константы. М., Госатомиздат, 1963.
6. Вейнберг А., Вигиер Е. Физическая теория ядерных реакторов. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
7. Физика ядерных реакторов. Под ред. И. А. Стенбока. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1964.
8. Rayburn L. A. "Phys. Rev.", 1961, v. 122, p. 168.

9. Ferguson J. M., Thompson W. E. "Phys. Rev.", 1960, v. 118, p. 228.
10. Prestwood R. J., Bayhurst B. P. "Phys. Rev.", 1961, v. 121, p. 1458.
11. Schmidt J. J. Neutron Cross Sections for Fast Reactor Materials. Karlsruhe, 1962.
12. De Juren I. A., Stoksberry R. W., Wallis M. "Phys. Rev.", 1962, v. 127, p. 1229.
13. Cohen A. V., White P. H. "Nucl. Phys.", 1956, v. 1, p. 73.
14. Marion J. B., Brugger R. M., Chapman R. A. "Phys. Rev.", 1956, v. 101, p. 245.
15. Grundl J. A. e. a. "Phys. Rev.", 1958, v. 109, p. 425.
16. Allen L. e. a. "Phys. Rev.", 1957, v. 107, p. 1363.
17. Terrell J., Holm D. M. "Phys. Rev.", 1958, v. 109, p. 2031.
18. Stelson P. H., Campbell E. C. "Phys. Rev.", 1957, v. 106, p. 1253.
19. Bass R. e. a. "Nucl. Phys.", 1961, v. 23, p. 122.
20. Battat M. E., Ribe F. H. "Phys. Rev.", 1953, v. 89, p. 80.
21. Frye G. M., Gamneel J. H. "Phys. Rev.", 1956, v. 103, p. 328.
22. Wymak M. E. e. a. "Phys. Rev.", 1958, v. 112, p. 1265.
23. Schmitt H. W., Halpern J. "Phys. Rev.", 1961, v. 121, p. 827.
24. Bichsel H., Bonner T. W. "Phys. Rev.", 1957, v. 108, p. 1025.
25. Бекурц К., Виртц К. Нейтронная физика. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1968.
26. Murrey R. B., Schmidt H. W. "Phys. Rev.", 1959, v. 115, p. 1707.
27. Smith D. M., Bostrom N. A., Hudspoth E. L. "Phys. Rev.", 1960, v. 117, p. 514.

ГЛАВА 40

РЕАКЦИИ, ПРИВОДЯЩИЕ К ОБРАЗОВАНИЮ НЕЙТРОНОВ

40.1. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ НЕЙТРОНОВ

Для получения нейтронов обычно используют различные ядерные реакции, в которых участвуют ядра со слабосвязанными нейтронами. Как правило, в этих реакциях образуется сначала возбужденное промежуточное ядро с энергией возбуждения, равной сумме энергии связи и кинетической энергии (в системе центра

масс) налетающей частицы, которая может быть γ -квантом, протоном или α -частицей. Если энергия возбуждения больше энергии связи «последнего нейтрона» в промежуточном ядре, то вероятность излучения нейтрона достаточно велика.

40.2. РЕАКЦИИ (γ, n)

Фотонейтронные источники. Лишь для двух ядер, ^2H и ^9Be , можно подобрать радиоактивные излучатели γ -квантов, такие, у которых энергия γ -квантов E_{γ} была бы выше порога $E_{п}$ реакции (γ, n) . Поэтому все радиоактивные (γ, n) -источники содержат в качестве материала мишени дейтерий или бериллий [2]. Сечения реакций (γ, n) приведены на рис. 40.1. В принципе (за исключением разброса из-за различия в направлениях γ -квантов и испускаемых нейтронов) радиоактивные фотонейтронные источники позволяют получить моноэнергетические нейтроны. Энергия фотонейтронов может быть оценена из [2]:

$$E_n = \frac{A-1}{A} \left[E_{\gamma} - E_{п} - \frac{E_{\gamma}^2}{1862(A-1)} \right] + \delta,$$

где A — масса ядра мишени; E_n , E_{γ} и $E_{п}$, Мэв;

$$\delta = E_{\gamma} \cos \theta \left[\frac{2(A-1)(E_{\gamma} - E_{п})}{931 A^3} \right]^{1/2};$$

θ — угол между направлениями γ -кванта и испускаемого нейтрона.

Таблица 40.1

Энергия связи $E_{св}$ последнего нейтрона в легких ядрах [7]

Ядро	$E_{св}, \text{ Мэв}$	Ядро	$E_{св}, \text{ Мэв}$
^2H	2,225	^{12}C	18,720
^3H	6,258	^{13}C	4,937
^3He	7,719	^{14}C	8,176
^4He	20,577	^{13}N	20,326
^5He	-0,956	^{14}N	10,553
^6Li	5,663	^{15}N	10,834
^7Li	7,253	^{16}N	2,500
^8Li	2,033	^{15}O	13,222
^8Be	18,896	^{16}O	15,669
^9Be	1,665	^{17}O	4,142
^{10}Be	6,814	^{18}O	8,047
^9B	18,575	^{18}F	9,141
^{10}B	8,440	^{19}F	10,442
^{11}B	11,456	^{20}F	6,599
^{11}C	13,092		

Таблица 40.2

Эnergии E_n порогов (γ , n) реакций [1. 4]

Ми- шень	A	E_n , Мэв	Ми- шень	A	E_n , Мэв
H	2	2,226 ± 0,003	Zr	90	12,48 ± 0,15
	3	6,25 ± 0,01		91	7,2 ± 0,4
Li	6	5,35 ± 0,20	Nb	93	8,78 ± 0,06
	7	7,15 ± 0,07	Mo	92	13,28 ± 0,15
Be	9	1,666 ± 0,002		97	7,1 ± 0,3
B	10	8,55 ± 0,25	Rh	103	9,35 ± 0,2
	11	11,50 ± 0,25	Ag	107	9,353 ± 0,034
C	12	18,7 ± 0,1		109	9,196 ± 0,026
N	14	10,54 ± 0,1	Cd	113	6,5 ± 0,15
O	16	16,3 ± 0,4	In	115	9,05 ± 0,2
F	19	10,4 ± 0,3	Sn	118	9,10 ± 0,2
Na	23	12,05 ± 0,2		119	6,55 ± 0,15
Mg	24	16,4 ± 0,2		124	8,50 ± 0,15
	25	7,25 ± 0,2	Sb	121	9,31 ± 0,06
	26	11,15 ± 0,2		123	8,98 ± 0,05
Al	27	12,75 ± 0,2	Te	125	6,56 ± 0,06
Si	28	16,8 ± 0,4	I	127	9,135 ± 0,022
	29	8,45 ± 0,2	Os	133	8,988 ± 0,033
	30	10,6 [2]	Ba	137	6,949 ± 0,038
P	31	12,2 ± 0,2	La	139	8,775 ± 0,025
S	32	14,8 ± 0,4	Ce	140	9,05 ± 0,2
	34	10,85 ± 0,2		142	7,15 ± 0,2
Cl	35	12,66 ± 0,04 [3]	Pr	141	9,361 ± 0,023
	37	10,307 ± 0,038	Nd	145	≤ 6,38 ± 0,16
Ar	40	9,8 [2]		150	7,40 ± 0,2
K	39	13,2 ± 0,2	Sm	149	6,45 ± 0,16
Ca	40	15,9 ± 0,4	Eu	151	8,04 ± 0,11
	44	11,4 [2]		153	8,65 ± 0,13
Sc	45	12,0 [2]	Gd	157	6,39 ± 0,11
Ti	46	13,3 ± 0,2	Tb	159	8,141 ± 0,039
	49	8,7 ± 0,3	Dy	163	6,32 ± 0,11
V	51	11,15 ± 0,2	Ho	165	8,16 ± 0,08
Cr	50	13,4 ± 0,2	Er	167	6,64 ± 0,08
	52	11,80 ± 0,25	Tm	169	8,11 ± 0,05
	53	7,75 ± 0,2	Yb	173	6,50 ± 0,08
Mn	55	10,1 ± 0,2	Lu	175	7,88 ± 0,08
Fe	54	13,8 ± 0,2	Hf	177	6,692 ± 0,034
	56	11,15 ± 0,25		179	6,31 ± 0,07
	57	7,75 ± 0,2		180	7,85 ± 0,11
Co	59	10,25 ± 0,2	Ta	181	7,640 ± 0,025
Ni	58	11,7 ± 0,2	W	183	6,29 ± 0,05
	60	11,6 [2]		186	7,28 ± 0,06
Cu	63	10,9 ± 0,2	Re	187	7,18 ± 0,08
	65	10,0 ± 0,2	Ir	193	7,79 ± 0,05
Zn	64	11,7 ± 0,2	Pt	194	9,50 ± 0,2
	66	11,15 ± 0,2		195	6,205 ± 0,04
	67	7,0 ± 0,2		196	8,29 ± 0,14
	68	10,15 ± 0,2	Au	197	8,057 ± 0,022
	70	9,2 ± 0,2	Hg	199	6,59 ± 0,09
Ga	69	10,10 ± 0,2		201	6,21 ± 0,07
	71	9,05 ± 0,2		202	7,60 ± 0,13
Ge	73	6,58 ± 0,16 [5]	Tl	203	8,80 ± 0,2
As	75	10,259 ± 0,031		205	7,515 ± 0,029
Se	82	9,8 ± 0,5	Pb	206	8,09 ± 0,07
Br	79	10,65 ± 0,2		207	6,790 ± 0,023
	81	10,130 ± 0,035		208	7,404 ± 0,028
Rb	85	10,65 ± 0,08	Bi	209	7,432 ± 0,010
	87	9,93 ± 0,07	Th	232	6,35 ± 0,04
Sr	86	9,50 ± 0,2	U	238	5,97 ± 0,10
	87	8,40 ± 0,2			
	88	11,15 ± 0,2			
Y	89	≤ 11,59 ± 0,08			

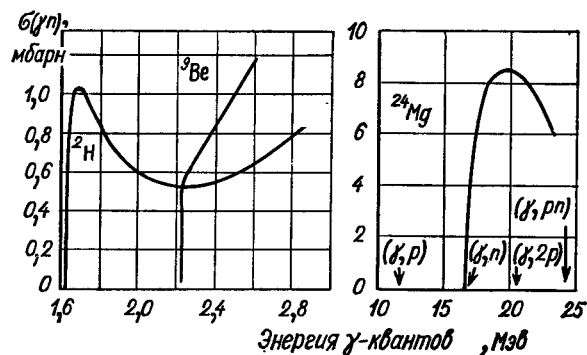
Рис. 40.1. Зависимость сечений реакции $\sigma(\gamma, n)$ для дейтерия, бериллия и ^{24}Mg [2]. Стрелками показано расположение порогов для различных фотондерных реакций на ^{24}Mg .

Таблица 40.3

Характеристики фотонейтронных источников [2. 6]

Обозначения: $T_{1/2}$ — период полураспада; E_γ — энергия γ -квантов; E_n — средняя энергия нейтронов; I — стандартный выход из мишени массой 1 г, находящейся на расстоянии 1 см от источника γ -квантов с активностью 1 кюри

Источник	$T_{1/2}$	E_γ , Мэв	E_n , Мэв	I , 10 ⁴ нейтрон/сек. Кюри
$^{24}\text{Na} + \text{Be}$	14,8 ч	2,76	0,83	14
$^{24}\text{Na} + \text{D}_2\text{O}$	14,8 ч	2,76	0,22	29
$^{56}\text{Mn} + \text{D}_2\text{O}$	2,59 ч	2,7	0,22	0,31
$^{56}\text{Mn} + \text{Be}$	2,59 ч	1,81; 2,13; 2,7	0,15; 0,30	2,9
$^{72}\text{Ga} + \text{Be}$	14,1 ч	1,87; 2,21; 2,51	0,2	5,9
$^{72}\text{Ga} + \text{D}_2\text{O}$	14,1 ч	2,51	0,13	6,9
$^{33}\text{Y} + \text{Be}$	87 дней	1,9; 2,8	0,158	10
$^{33}\text{Y} + \text{D}$	87 дней	2,8	~0,31	0,3
$^{116}\text{In} + \text{Be}$	54 мин	1,8; 2,1	0,30	0,82
$^{124}\text{Sb} + \text{Be}$	60 дней	1,7	0,024	19
$^{140}\text{La} + \text{Be}$	40 дней	2,50	0,62	0,3
$^{140}\text{La} + \text{D}_2\text{O}$	40 дней	2,50	0,151	0,8
$^{228}\text{Ra} + \text{D}_2\text{O}$	6,7 лет	2,62	0,197	9,5
$^{228}\text{Ra} + \text{Be}$	6,7 лет	1,80; 2,62	0,827	3,5
$\text{Ra} + \text{Be}$	1620 лет	1,69; 1,75; 1,82; 2,09; 2,20; 2,42	—	3,0
$\text{Ra} + \text{D}_2\text{O}$	1620 лет	2,42	0,12	0,1

Таблица 40.4

Максимальное сечение $\sigma_{\text{макс}}$ реакции (γ, n)
и положение пика $E_{\text{макс}}$ [2]

Мишень	$E_{\text{макс}}, \text{Мэв}$	$\sigma_{\text{макс}}, \text{мбарн}$
Li	17,5	4
^{12}C	22,5	8,3
^{16}O	24,2	11,4
^{14}N	24,2	2,8
^{24}Mg	20	8,5
^{25}Mg	20	16
^{29}Si	15	23
^{31}P	19	16,6
Cl	19	33
^{40}Ar	20	38
^{40}Ca	19,5	15
^{51}V	17,7	100
Cr	19,7	105
Ni	16,5	50
Br	16,0	175
^{86}Sr	16,0	155
^{88}Sr	16,8	200
^{89}Y	16,3	190
^{90}Zr	16,4	180
^{91}Zr	16,3	200
Ta	15	630
Pa	13,7	810
Bi	14,2	920

Таблица 40.5

Образование фотонейтронов в D_2O под действием
долгоживущих продуктов деления ^{235}U [8]

Период полураспада	Число фотонейтронов на один нейтрон деления, 10^{-4}
53 ч	0,0106
4,4 ч	0,033
1,65 ч	0,241
27 мин	0,214
7,7 мин	0,346
2,4 мин	0,728
41 сек	2,11
2,5 сек	6,73
Полное количество фотонейтронов на один нейтрон деления	10,41

Источники нейтронов на основе тормозного излучения электронных ускорителей. При соударении быстрых электронов с ядрами мишени возникает интенсивное тормозное излучение. Если энергия γ -квантов E_γ тормозного излучения превосходит энергию связи нейтронов в ядрах вещества мишени, то могут быть получены нейтроны в результате реакции (γ, n) . Выход нейтронов быстро растет с увеличением энергии электронов. При

бомбардировке толстой урановой мишени электронами с энергией 40 Мэв выход нейтронов составляет $\sim 10^{14}$ нейтрон/сек при токе электронов 1 ма [7].

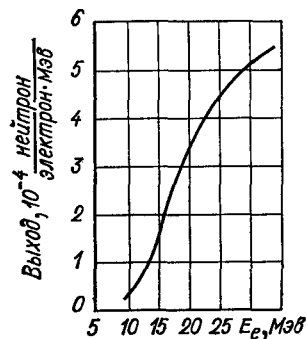


Рис. 40.2. Зависимость выхода нейтронов из толстой урановой мишени от энергии бомбардирующих электронов E_e [7].

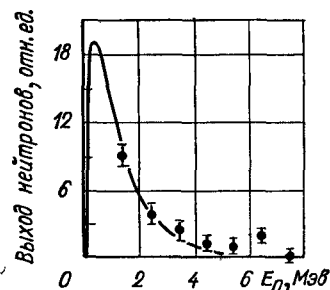
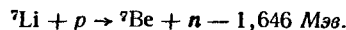
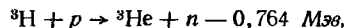


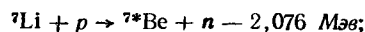
Рис. 40.3. Спектр фотонейтронов, испускаемых висмутом при облучении γ -квантами тормозного излучения с $E_\gamma = 22 \text{ Мэв}$ [2]. Сплошная кривая — расчет, точки — эксперимент.

40.3. РЕАКЦИИ (p, n)

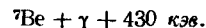
Реакции (p, n) широко используются для получения моноэнергетических нейтронов. Этому способствуют низкие значения порога реакции E_p и большие выходы нейтронов. Наиболее распространенные реакции (p, n) [7]:



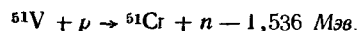
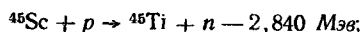
При энергиях протонов $E_p > 2,378 \text{ Мэв}$ возможна реакция



↓



Доля реакции $^7\text{Li} + p \rightarrow ^7\text{Be}$ составляет $\sim 10\%$ основной реакции:



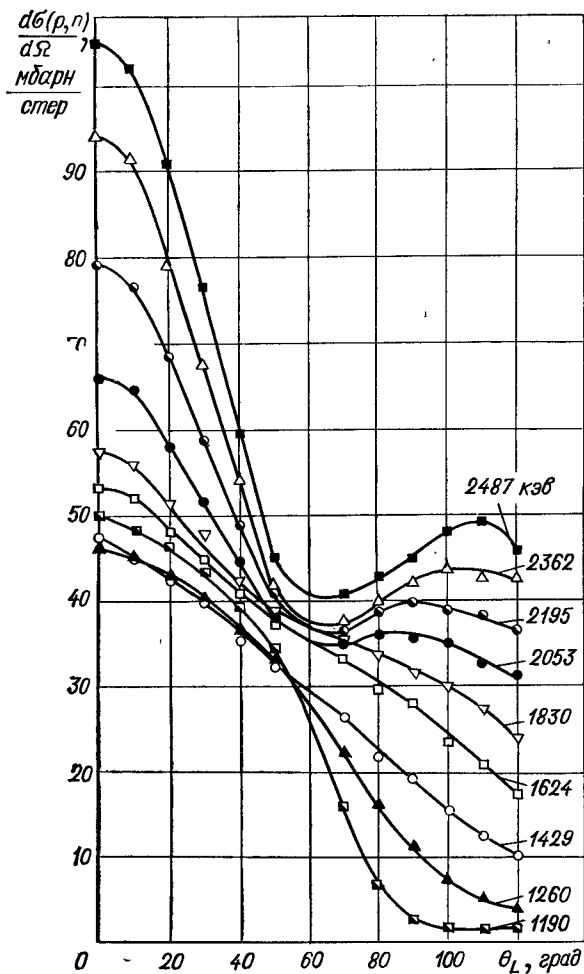


Рис. 40.4. Зависимость дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ реакции $T(p, n)^3\text{He}$ в лабораторной системе координат [24, 27]. Угол разлета нейтронов θ_L и энергия протонов (кэВ) относятся к лабораторной системе координат.

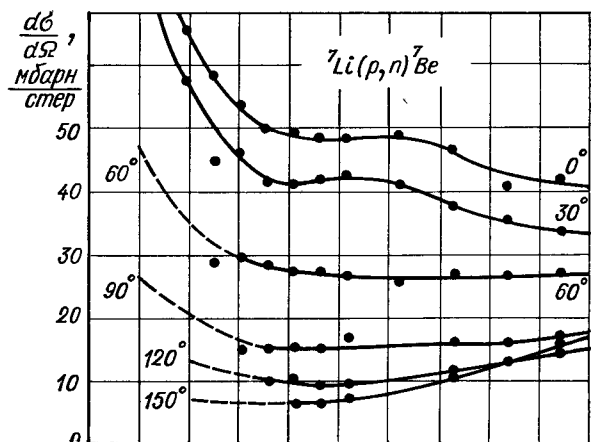


Рис. 40.5. Зависимость дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ реакций ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ [21] и ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}^*$ $E^* = 430$ кэВ [21]. Угол разлета нейтронов θ_L и энергия протонов E_p относятся к лабораторной системе координат.

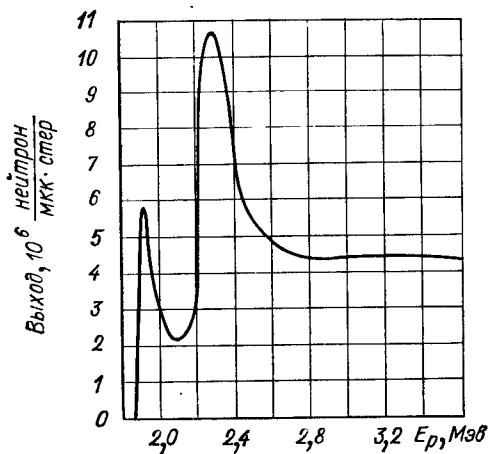
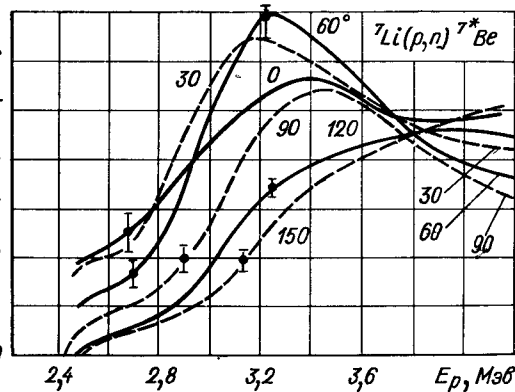


Рис. 40.6. Зависимость выхода нейтронов в реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ в направлении вперед от энергии протонов E_p [2].

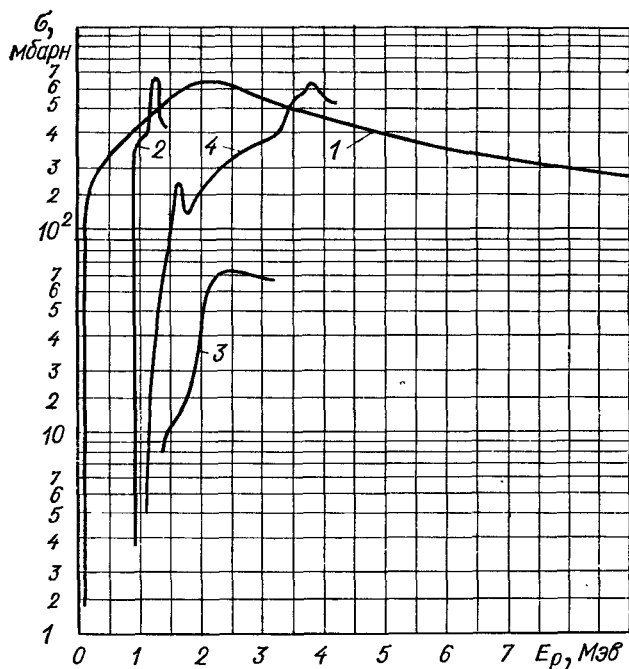


Рис. 40.7. Зависимость сечения σ от энергии протонов E_p для реакций:

- 1 — $T(p, n)^3\text{He}$ [20, 24];
 2 — $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ [2, 20];
 3 — $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ ($E^* = 430$ кэВ) [21];
 4 — $^9\text{Be}(p, n)^9\text{B}$ [22].

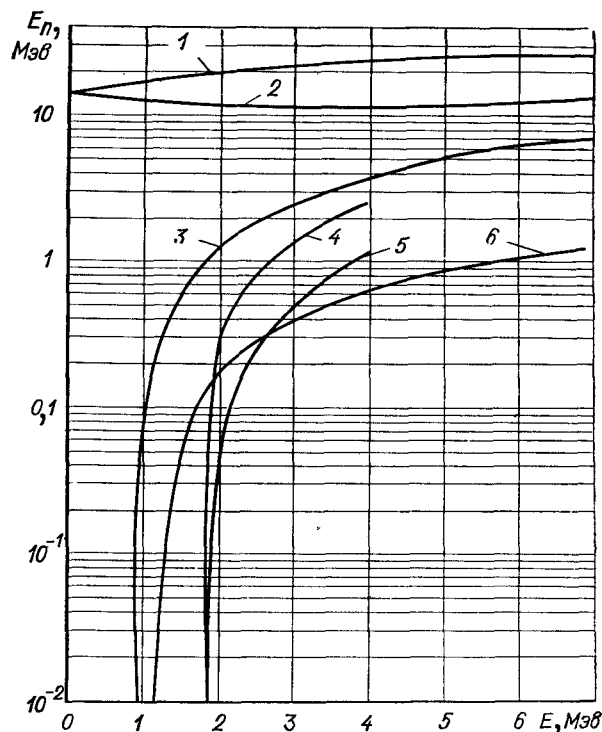


Рис. 40.8. Зависимость энергии E_n нейтронов, испускаемых под углом θ_L [2], от энергии бомбардирующей частицы E в различных реакциях:

- 1 — $^3\text{H}(d, n)^4\text{He}$, $\theta_L = 0^\circ$;
 2 — $^3\text{H}(d, n)^4\text{He}$, $\theta_L = 180^\circ$;
 3 — $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$, $\theta_L = 0^\circ$;
 4 — $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$, $\theta_L = 180^\circ$;
 5 — $^3\text{H}(p, n)^3\text{He}$, $\theta_L = 0^\circ$;
 6 — $^3\text{H}(p, n)^3\text{He}$, $\theta_L = 180^\circ$.

Таблица 40.6

Значения пороговой энергии E_n реакции (p, n)

Мишень	A	E_n , Мэв	Литература	Мишень	A	E_n , Мэв	Литература
H	2	$3,339 \pm 0,015$	[11]	Fe	56	$5,451 \pm 0,010$	[12]
	3	$1,019 \pm 0,001$	[11]	Co	59	$1,895 \pm 0,005$	[16]
Li	7	$1,882 \pm 0,002$	[11]	Ni	60	2,8	[12]
Be	9	$2,059 \pm 0,002$	[11]		61	2,8	[12]
B	10	$4,835 \pm 0,025$	[9]		64	2,4	[12]
	11	$3,015 \pm 0,003$	[11]	Cu	63	$4,123 \pm 0,008$	[11]
C	12	$20,1 \pm 0,1$	[11]		65	$2,170 \pm 0,005$	[11]
	13	$3,236 \pm 0,003$	[11]	Zn	66	5,9	[12]
	14	$0,664 \pm 0,009$	[11]		67	$1,805 \pm 0,005$	[16]
N	15	$3,7808 \pm 0,0011$	[10]		68	$3,762 \pm 0,005$	[16]
O	18	$2,590 \pm 0,004$	[11]		70	$1,457 \pm 0,002$	[15]
F	19	$4,233 \pm 0,002$	[10]	Ga	69	4,0	[12]
Na	23	$5,053 \pm 0,010$	[11]	As	75	$1,669 \pm 0,002$	[15]
Mg	25	$5,289 \pm 0,025$	[11]	Se	77	$2,175 \pm 0,004$	[17]
Al	27	$5,800 \pm 0,008$	[12]	Br	79	2,7	[12]
Cl	37	$1,640 \pm 0,004$	[11]	Rb	87	2,0	[12]
Ar	40	$2,390 \pm 0,010$	[13]	Sr	88	$4,457 \pm 0,010$	[12]
Sc	45	$2,908 \pm 0,004$	[14]	Y	89	3,6	[12]
Ti	48	$4,905 \pm 0,010$	[12]	Zr	90	7,0	[12]
V	51	$1,562 \pm 0,006$	[11]	Ru	99	2,4	[12]
Cr	52	5,4	[12]		101	1,4	[12]
Mn	55	$1,034 \pm 0,002$	[15]	Cd	111	1,6	[12]
					114	3,0	[12]
					133	1,0	[12]
					142	3,5	[12]

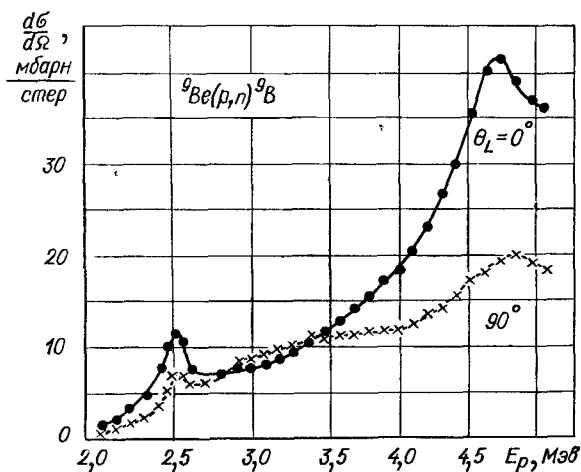


Рис. 40.9. Зависимость дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ реакции $^9\text{Be}(p, n)^9\text{B}$ для различных углов вылета нейтронов θ_L в лабораторной системе координат от энергии протонов E_p [18].

Энергия нейтронов, образующихся в реакции $T(p, n)^3\text{He}$

Энергия нейтронов E_n , Мэв, представлена в зависимости от энергии налетающих протонов E_p и угла вылета нейтронов θ_L в лабораторной системе координат.

Массы покоя участвующих в реакции частиц равны соответственно: T — 3,0170050 а. е. м.; p — 1,0081450 а. е. м.; ^3He — 3,0169860 а. е. м.; n — 1,0089861 а. е. м.

θ_L , град	Энергия протонов E_p , Мэв											
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2
0	0,2238	0,3497	0,4643	0,5741	0,6814	0,7869	0,8914	0,9951	1,0982	1,2008	1,3030	1,4050
5	0,2217	0,3474	0,4617	0,5713	0,6783	0,7836	0,8878	0,9912	1,0941	1,1964	1,2983	1,4001
10	0,2154	0,3406	0,4542	0,5630	0,6692	0,7737	0,8772	0,9798	1,0818	1,1835	1,2846	1,3856
15	0,2051	0,3294	0,4418	0,5493	0,6543	0,7575	0,8597	0,9610	1,0618	1,1622	1,2620	1,3617
20	0,1910	0,3143	0,4250	0,5308	0,6339	0,7354	0,8358	0,9354	1,0344	1,1330	1,2312	1,3291
30	0,1535	0,2739	0,3799	0,4809	0,5792	0,6759	0,7715	0,8663	0,9605	1,0543	1,1477	1,2409
40	0,1067	0,2242	0,3241	0,4188	0,5107	0,6010	0,6903	0,7789	0,8668	0,9545	0,0417	1,1287
50	0,0528	0,1710	0,2634	0,3504	0,4348	0,5177	0,5997	0,6809	0,7616	0,8421	0,9221	1,0020
60	—	0,1203	0,2039	0,2823	0,3584	0,4331	0,5070	0,5804	0,6533	0,7259	0,7982	0,8704
70	—	0,0773	0,1508	0,2199	0,2871	0,3534	0,4190	0,4843	0,5492	0,6139	0,6784	0,7427
80	—	0,0454	0,1074	0,1669	0,2252	0,2831	0,3406	0,3979	0,4550	0,5120	0,5689	0,6257
90	—	0,0251	0,0749	0,1248	0,1746	0,2245	0,2744	0,3243	0,3740	0,4240	0,4738	0,5236
100	—	0,0139	0,0522	0,0934	0,1354	0,1781	0,2210	0,2642	0,3075	0,3511	0,3946	0,4382
110	—	0,0082	0,0372	0,0708	0,1062	0,1427	0,1796	0,2171	0,2548	0,2928	0,3309	0,3691
120	—	0,0053	0,0275	0,0552	0,0851	0,1164	0,1485	0,1812	0,2142	0,2476	0,2812	0,3150
130	—	0,0037	0,0213	0,0445	0,0702	0,0974	0,1256	0,1544	0,1837	0,2135	0,2435	0,2737
140	—	0,0028	0,0173	0,0372	0,0597	0,0839	0,1091	0,1350	0,1614	0,1884	0,2155	0,2429
150	—	0,0023	0,0148	0,0324	0,0527	0,0746	0,0976	0,1214	0,1457	0,1705	0,1956	0,2210
160	—	0,0020	0,0132	0,0294	0,0481	0,0686	0,0901	0,1124	0,1353	0,1587	0,1824	0,2063
170	—	0,0019	0,0124	0,0277	0,0456	0,0652	0,0859	0,1073	0,1294	0,1519	0,1748	0,1979
180	—	0,0018	0,0121	0,0272	0,0448	0,0641	0,0845	0,1057	0,1274	0,1497	0,1723	0,1952

θ_L , град	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4
0	1,5067	1,6082	1,7096	1,8109	1,9119	2,0131	2,1139	2,2148	2,3155	2,4164	2,5169	2,6177
5	1,5015	1,6028	1,7039	1,8050	1,9058	2,0066	2,1072	2,2079	2,3083	2,4089	2,5092	2,6097
10	1,4862	1,5868	1,6871	1,7874	1,8874	1,9875	2,0873	2,1872	2,2869	2,3867	2,4863	2,5860
15	1,4611	1,5604	1,6595	1,7585	1,8573	1,9561	2,0547	2,1533	2,2517	2,3503	2,4486	2,5470
20	1,4268	1,5243	1,6217	1,7190	1,8160	1,9131	2,0100	2,1068	2,2036	2,3004	2,3970	2,4937
30	1,3339	1,4266	1,5193	1,6118	1,7041	1,7965	1,8886	1,9808	2,0728	2,1649	2,2568	2,3488
40	1,2155	1,3022	1,3887	1,4751	1,5613	1,6475	1,7336	1,8196	1,9056	1,9916	2,0774	2,1633
50	1,0817	1,1612	1,2406	1,3199	1,3991	1,4783	1,5573	1,6363	1,7152	1,7942	1,8730	1,9518
60	0,9425	1,0143	1,0861	1,1578	1,2295	1,3011	1,3725	1,4440	1,5154	1,5868	1,6581	1,7295
70	0,8070	0,8712	0,9353	0,9993	1,0633	1,1273	1,1911	1,2549	1,3188	1,3826	1,4463	1,5101
80	0,6825	0,7392	0,7959	0,8526	0,9092	0,9658	1,0223	1,0789	1,1354	1,1920	1,2484	1,3050
90	0,5735	0,6233	0,6732	0,7230	0,7728	0,8227	0,8725	0,9223	0,9721	1,0219	1,0717	1,1216
100	0,4819	0,5255	0,5693	0,6131	0,6569	0,7007	0,7446	0,7884	0,8323	0,8762	0,9201	0,9640
110	0,4075	0,4459	0,4845	0,5231	0,5617	0,6004	0,6391	0,6778	0,7166	0,7554	0,7942	0,8331
120	0,3490	0,3830	0,4172	0,4515	0,4858	0,5202	0,5546	0,5891	0,6237	0,6582	0,6928	0,7274
130	0,3041	0,3346	0,3653	0,3961	0,4269	0,4579	0,4889	0,5199	0,5510	0,5822	0,6134	0,6446
140	0,2706	0,2984	0,3264	0,3544	0,3826	0,4109	0,4392	0,4676	0,4960	0,5245	0,5531	0,5816
150	0,2466	0,2724	0,2983	0,3244	0,3506	0,3768	0,4032	0,4296	0,4560	0,4826	0,5091	0,5358
160	0,2306	0,2549	0,2785	0,3042	0,3290	0,3539	0,3788	0,4039	0,4290	0,4542	0,4794	0,5047
170	0,2214	0,2449	0,2687	0,2925	0,3165	0,3406	0,3648	0,3891	0,4134	0,4378	0,4622	0,4867
180	0,2184	0,2416	0,2651	0,2887	0,3125	0,3363	0,3602	0,3842	0,4083	0,4324	0,4566	0,4808

θ_L , град	Энергия протонов E_p , Мэв											
	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6
0	2,7181	2,8188	2,9192	3,0198	3,1201	3,2206	3,3209	3,4214	3,5216	3,6220	3,7223	3,8227
5	2,7099	2,8103	2,9105	3,0108	3,1109	3,2111	3,3112	3,4114	3,5114	3,6115	3,7115	3,8117
10	2,6854	2,7850	2,8845	2,9840	3,0833	3,1828	3,2821	3,3816	3,4808	3,5802	3,6794	3,7788
15	2,6452	2,7436	2,8418	2,9400	3,0381	3,1363	3,2344	3,3326	3,4305	3,5287	3,6266	3,7248
20	2,5902	2,6868	2,7833	2,8798	2,9762	3,0727	3,1690	3,2655	3,3617	3,4581	3,5544	3,6508
30	2,4406	2,5325	2,6243	2,7161	2,8078	2,8996	2,9912	3,0830	3,1745	3,2662	3,3578	3,4495
40	2,2491	2,3349	2,4206	2,5063	2,5920	2,6777	2,7632	2,8489	2,9344	3,0201	3,1056	3,1912
50	2,0306	2,1093	2,1881	2,2668	2,3454	2,4241	2,5027	2,5814	2,6599	2,7385	2,8170	2,8957
60	1,8007	1,8720	1,9432	2,0144	2,0856	2,1568	2,2279	2,2991	2,3702	2,4413	2,5124	2,5835
70	1,5738	1,6375	1,7012	1,7649	1,8285	1,8922	1,9558	2,0194	2,0830	2,1466	2,2102	2,2738
80	1,3614	1,4179	1,4743	1,5308	1,5872	1,6436	1,7000	1,7565	1,8128	1,8692	1,9256	1,9820
90	1,1714	1,2212	1,2710	1,3208	1,3706	1,4204	1,4702	1,5200	1,5698	1,6195	1,6692	1,7191
100	1,0079	1,0518	1,0957	1,1397	1,1836	1,2275	1,2714	1,3154	1,3593	1,4032	1,4472	1,4912
110	0,8719	0,9108	0,9497	0,9885	1,0274	1,0663	1,1052	1,1442	1,1831	1,2220	1,2609	1,2999
120	0,7621	0,7967	0,8315	0,8661	0,9008	0,9356	0,9703	1,0051	1,0398	1,0746	1,1094	1,1441
130	0,6759	0,7071	0,7385	0,7698	0,8011	0,8325	0,8638	0,8952	0,9266	0,9580	0,9895	1,0209
140	0,6103	0,6389	0,6676	0,6963	0,7250	0,7537	0,7825	0,8113	0,8400	0,8688	0,8976	0,9265
150	0,5624	0,5891	0,6158	0,6426	0,6693	0,6961	0,7229	0,7497	0,7766	0,8034	0,8303	0,8572
160	0,5300	0,5553	0,5807	0,6061	0,6315	0,6569	0,6824	0,7079	0,7334	0,7589	0,7844	0,8100
170	0,5112	0,5357	0,5603	0,5849	0,6096	0,6342	0,6589	0,6836	0,7083	0,7330	0,7578	0,7826
180	0,5051	0,5293	0,5537	0,5780	0,6024	0,6268	0,6512	0,6757	0,7001	0,7246	0,7491	0,7736

θ_L , град	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8
0	3,9229	4,0233	4,1234	4,2237	4,3240	4,4242	4,5245	4,6246	4,7248	4,8249	4,9252	5,0254
5	3,9116	4,0117	4,1116	4,2116	4,3117	4,4116	4,5116	4,6115	4,7115	4,8114	4,9113	5,0113
10	3,8780	3,9773	4,0765	4,1757	4,2750	4,3741	4,4734	4,5725	4,6718	4,7709	4,8701	4,9693
15	3,8227	3,9208	4,0187	4,1167	4,2147	4,3126	4,4106	4,5085	4,6065	4,7043	4,8023	4,9002
20	3,7470	3,8434	3,9396	4,0358	4,1321	4,2283	4,3246	4,4207	4,5170	4,6131	4,7094	4,8056
30	3,5410	3,6327	3,7242	3,8157	3,9074	3,9988	4,0904	4,1819	4,2734	4,3649	4,4564	4,5479
40	3,2767	3,3623	3,4477	3,5332	3,6188	3,7042	3,7897	3,8751	3,9606	4,0460	4,1315	4,2169
50	2,9742	3,0528	3,1312	3,2097	3,2883	3,3667	3,4453	3,5237	3,6022	3,6806	3,7591	3,8375
60	2,6546	2,7257	2,7967	2,8677	2,9388	3,0098	3,0808	3,1518	3,2229	3,2938	3,3648	3,4358
70	2,3373	2,4009	2,4645	2,5280	2,5915	2,6550	2,7186	2,7821	2,8456	2,9091	2,9726	3,0361
80	2,0384	2,0948	2,1512	2,2075	2,2638	2,3202	2,3766	2,4329	2,4892	2,5456	2,6019	2,6582
90	1,7689	1,8187	1,8685	1,9182	1,9680	2,0178	2,0675	2,1173	2,1670	2,2168	2,2665	2,3163
100	1,5351	1,5790	1,6230	1,6669	1,7108	1,7548	1,7987	1,8427	1,8866	1,9305	1,9745	2,0184
110	1,3389	1,3778	1,4168	1,4556	1,4946	1,5336	1,5725	1,6115	1,6504	1,6894	1,7283	1,7673
120	1,1790	1,2137	1,2486	1,2833	1,3181	1,3529	1,3877	1,4226	1,4574	1,4922	1,5270	1,5618
130	1,0524	1,0838	1,1153	1,1467	1,1781	1,2096	1,2411	1,2726	1,3041	1,3356	1,3670	1,3985
140	0,9553	0,9841	1,0130	1,0418	1,0707	1,0996	1,1284	1,1573	1,1862	1,2151	1,2440	1,2729
150	0,8841	0,9110	0,9379	0,9648	0,9917	1,0187	1,0456	1,0726	1,0995	1,1265	1,1534	1,1804
160	0,8356	0,8611	0,8867	0,9123	0,9378	0,9635	0,9891	1,0147	1,0403	1,0660	1,0916	1,1172
170	0,8074	0,8322	0,8570	0,8817	0,9066	0,9314	0,9562	0,9811	1,0059	1,0308	1,0556	1,0805
180	0,7982	0,8227	0,8472	0,8717	0,8963	0,9209	0,9455	0,9701	0,9946	1,0193	1,0438	1,0684

θ_L , град	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4
0	5,1255	5,2257	5,3258	5,4260	5,5262	5,6263	5,7265	5,8265	6,0269	6,2271	6,4273	6,6275
5	5,1111	5,2111	5,3109	5,4109	5,5108	5,6107	5,7106	5,8104	6,0103	6,2099	6,4096	6,6093
10	5,0684	5,1676	5,2666	5,3658	5,4650	5,5640	5,6633	5,7623	5,9606	6,1587	6,3569	6,5550
15	4,9980	5,0960	5,1938	5,2917	5,3897	5,4875	5,5854	5,6832	5,8790	6,0746	6,2703	6,4659
20	4,9017	4,9979	5,0940	5,1902	5,2864	5,3825	5,4787	5,5748	5,7671	5,9593	6,1515	6,3437
30	4,6394	4,7309	4,8223	4,9138	5,0053	5,0967	5,1882	5,2796	5,4625	5,6453	5,8281	6,0109
40	4,3023	4,3878	4,4731	4,5586	4,6440	4,7294	4,8148	4,9001	5,0709	5,2416	5,4123	5,5830
50	3,9159	3,9944	4,0728	4,1512	4,2297	4,3080	4,3865	4,4648	4,6217	4,7784	4,9351	5,0918

θ_L , град	Энергия протонов E_p , Мэв											
	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4
60	3,5068	3,5778	3,6487	3,7197	3,7907	3,8616	3,9326	4,0035	4,1454	4,2873	4,4291	4,5709
70	3,0096	3,1631	3,2265	3,2900	3,3535	3,4170	3,4805	3,5439	3,6708	3,7977	3,9245	4,0514
80	2,7145	2,7708	2,8272	2,8835	2,9398	2,9961	3,0524	3,1087	3,2213	3,3338	3,4464	3,5589
90	2,3660	2,4158	2,4655	2,5152	2,5650	2,6147	2,6645	2,7142	2,8136	2,9131	3,0125	3,1119
100	2,0623	2,1062	2,1502	2,1941	2,2380	2,2820	2,3259	2,3698	2,4577	2,5455	2,6333	2,7212
110	1,8063	1,8452	1,8842	1,9231	1,9621	2,0010	2,0400	2,0790	2,1569	2,2348	2,3127	2,3906
120	1,5967	1,6315	1,6663	1,7011	1,7360	1,7708	1,8057	1,8405	1,9101	1,9798	2,0495	2,1191
130	1,4300	1,4615	1,4931	1,5245	1,5560	1,5876	1,6191	1,6506	1,7136	1,7766	1,8396	1,9027
140	1,3018	1,3307	1,3596	1,3885	1,4174	1,4463	1,4753	1,5042	1,5620	1,6199	1,6777	1,7356
150	1,2074	1,2343	1,2613	1,2883	1,3153	1,3423	1,3693	1,3963	1,4502	1,5042	1,5583	1,6123
160	1,1429	1,1685	1,1942	1,2198	1,2455	1,2712	1,2968	1,3225	1,3738	1,4252	1,4765	1,5279
170	1,1054	1,1302	1,1551	1,1800	1,2048	1,2298	1,2547	1,2796	1,3293	1,3791	1,4289	1,4788
180	1,0931	1,1177	1,1423	1,1669	1,1915	1,2162	1,2408	1,2655	1,3147	1,3640	1,4133	1,4626

θ_L , град	7,6	7,8	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5
0	6,8278	7,0279	7,2281	7,7286	8,2288	8,7292	9,2295	9,7297	10,2300	10,7303	11,2305	11,7306
5	6,8091	7,0087	7,2083	7,7076	8,2065	8,7056	9,2046	9,7036	10,2026	10,7015	11,2004	11,6993
10	6,7533	6,9514	7,1495	7,6449	8,1401	8,6353	9,1305	9,6256	10,1208	10,6159	11,1110	11,6060
15	6,6617	6,8572	7,0528	7,5420	8,0308	8,5198	9,0086	9,4975	9,9864	10,4752	10,9640	11,4527
20	6,5360	6,7282	6,9203	7,4009	7,8811	8,3614	8,8417	9,3219	9,8021	10,2823	10,7625	11,2425
30	6,1938	6,3766	6,5593	7,0163	7,4731	7,9299	8,3866	8,8433	9,3000	9,7566	10,2131	10,6696
40	5,7538	5,9244	6,0950	6,5217	6,9481	7,3746	7,8010	8,2273	8,6533	9,0799	9,5060	9,9321
50	5,2486	4,4053	5,5619	5,9537	6,3451	6,7367	7,1281	7,5194	7,9108	8,3020	8,6932	9,0843
60	4,7128	4,8545	4,9963	5,3508	5,7050	6,0592	6,4134	6,7675	7,1215	7,4754	7,8293	8,1831
70	4,1782	4,3050	4,4318	4,7489	5,0657	5,3825	5,6993	6,0159	6,3325	6,6490	6,9655	7,2818
80	3,6715	3,7839	3,8964	4,1777	4,4588	4,7398	5,0208	5,3017	5,5825	5,8633	6,1440	6,4246
90	3,2113	3,3107	3,4101	3,6586	3,9069	4,1551	4,4034	4,6515	4,8996	5,1476	5,3956	5,6434
100	2,8090	2,8967	2,9846	3,2040	3,4234	3,6427	3,8621	4,0813	4,3004	4,5195	4,7386	4,9575
110	2,4685	2,5463	2,6242	2,8189	3,0135	3,2081	3,4027	3,5972	3,7916	3,9860	4,1803	4,3745
120	2,1888	2,2584	2,3281	2,5022	2,6763	2,8503	3,0244	3,1983	3,3722	3,5461	3,7199	3,8936
130	1,9657	2,0287	2,0917	2,2493	2,4067	2,5642	2,7217	2,8791	3,0365	3,1938	3,3511	3,5083
140	1,7934	1,8512	1,9091	2,0537	2,1983	2,3429	2,4875	2,6320	2,7765	2,9210	3,0654	3,2098
150	1,6663	1,7203	1,7743	1,9093	2,0443	2,1793	2,3143	2,4493	2,5842	2,7191	2,8539	2,9887
160	1,5792	1,6306	1,6820	1,8104	1,9388	2,0672	2,1956	2,3239	2,4523	2,5806	2,7088	2,8370
170	1,5286	1,5784	1,6282	1,7528	1,8773	2,0018	2,1264	2,2509	2,3754	2,4998	2,6242	2,7486
180	1,5119	1,5612	1,6106	1,7339	1,8571	1,9804	2,1037	2,2269	2,3501	2,4733	2,5964	2,7195

θ_L , град	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0	21,0	22,0	23,0	24,0	25,0
0	12,2307	12,7309	13,2311	13,7312	14,2312	15,2316	16,2316	17,2319	18,2320	19,2322	20,2322	21,2323	22,2325	23,2326	24,2326
5	12,1981	12,6970	13,1959	13,6947	14,1934	15,1912	16,1887	17,1863	18,1839	19,1815	20,1789	21,1764	22,1740	23,1714	24,1689
10	12,1010	12,5960	13,0911	13,5861	14,0810	15,0710	16,0608	17,0507	18,0406	19,0304	20,0202	21,0099	21,9997	22,9894	23,9791
15	11,9414	12,4301	12,9189	13,4075	13,8961	14,8735	15,8506	16,8279	17,8050	18,7822	19,7592	20,7362	21,7133	22,6902	23,6671
20	11,7225	12,2026	12,6827	13,1627	13,6426	14,6027	15,5624	16,5223	17,4821	18,4418	19,4014	20,3610	21,3206	22,2801	23,2395
30	11,1261	11,5825	12,0390	12,4954	12,9517	13,8644	14,7769	15,6894	16,6017	17,5140	18,4260	19,3381	20,2501	21,1619	22,0737
40	10,3582	10,7842	11,2102	11,6362	12,0620	12,9138	13,7653	14,6168	15,4680	16,3191	17,1701	18,0209	18,8716	19,7221	20,5725
50	9,4753	9,8664	10,2573	10,6482	11,0390	11,8206	12,6019	13,3831	14,1641	14,9449	15,7254	16,5059	17,2861	18,0661	18,8459
60	8,5368	8,8906	9,2442	9,5978	9,9512	10,6581	11,3647	12,0711	12,7773	13,4832	14,1888	14,8943	15,5996	16,3046	17,0094
70	7,5981	7,9144	8,2306	8,5467	8,8627	9,4947	10,1263	10,7577	11,3889	12,0198	12,6504	13,2808	13,9110	14,5409	15,1705
80	6,7051	6,9857	7,2661	7,5465	7,8267	8,3871	8,9472	9,5071	10,0667	10,6261	11,1851	11,7439	12,3025	12,8607	13,4188
90	5,8912	6,1391	6,3867	6,6344	6,8819	7,3768	7,8715	8,3659	8,8600	9,3539	9,8475	10,3408	10,8339	11,3267	11,8193
100	5,1764	5,3953	5,6141	5,8329	6,0515	6,4886	6,9255	7,3622	7,7986	8,2347	8,6706	9,1062	9,5416	9,9767	10,4115
110	4,5688	4,7630	4,9570	5,1511	5,3451	5,7328	6,1204	6,5077	6,8948	7,2816	7,6681	8,0545	8,4406	8,8264	9,2120
120	4,0673	4,2410	4,4146	4,5882	4,7617	5,1085	5,4551	5,8015	6,1477	6,4936	6,8392	7,1847	7,5300	7,8749	8,2197
130	3,6655	3,8227	3,9798	4,1369	4,2939	4,6077	4,9213	5,2348	5,5480	5,8610	6,1738	6,4864	6,7987	7,1108	7,4228
140	3,3541	3,4985	3,6426	3,7869	3,9311	4,2192	4,5072	4,7950	5,0826	5,3700	5,6571	5,9441	6,2309	6,5174	6,8038
150	3,1235	3,2583	3,3929	3,5271	3,6622	3,9313	4,2002	4,4689	4,7375	5,0058	5,2739	5,5419	5,8096	6,0772	6,3445
160	2,9652	3,0935	3,2215	3,3496	3,4777	3,7336	3,9894	4,2450	4,5004	4,7557	5,0107	5,2655	5,5202	5,7746	6,0289
170	2,8729	2,9973	3,1215	3,2453	3,3700	3,6182	3,8664	4,1143	4,3621	4,6096	4,8570	5,1042	5,3512	5,5980	5,8447
180	2,8426	2,9657	3,0887	3,2117	3,3346	3,5803	3,8259	4,0714	4,3166	4,5616	4,8065	5,0512	5,2957	5,5400	5,7841

40.4 РЕАКЦИИ (d, n)

Почти все реакции (d, n), используемые для получения нейтронов, сильно экзотермичны. Реакции не имеют порогов, и нейтроны могут быть получены при энергиях дейтронов, приближающихся к нулю. Исключение составляет реакция $^{12}\text{C} (d, n) ^{13}\text{N}$, которая эндотермична с $Q = -0,282 \text{ Мэв}$ и порогом $E_n = 0,33 \text{ Мэв}$ [2]. Для получения моноэнергетических нейтронов наиболее пригодны реакции $\text{D} (d, n) ^3\text{He}$ и $\text{T} (d, n) ^4\text{He}$. Например, в последней реакции можно получить $\sim 10^{11}$ нейтрон/сек при бомбардировке $^3\text{H} - \text{Ti}$ мишени дейтронами с энергией 300 кэв и током 0,5 ма [7]. Наиболее распространенные реакции (d, n) [7]:

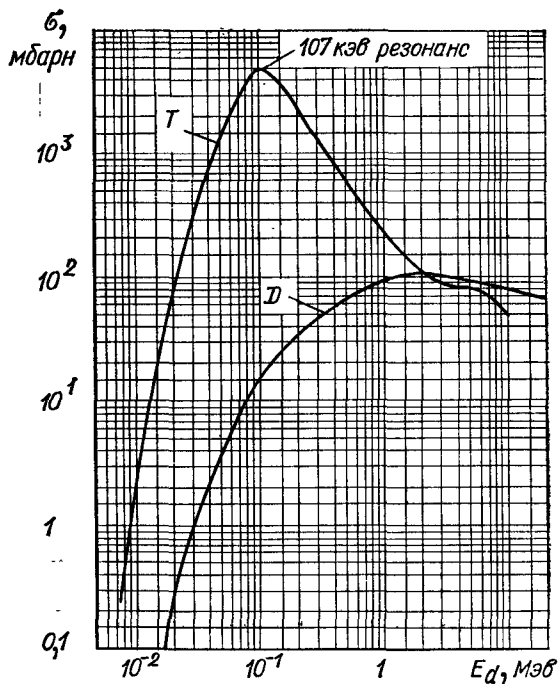
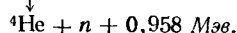
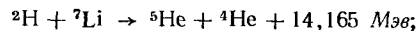
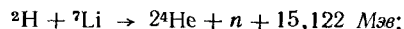
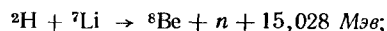
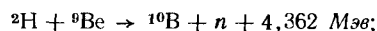
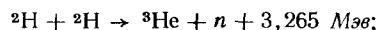


Рис. 40.10. Зависимость сечения σ реакций $\text{D}(d, n)^3\text{He}$ [2, 7, 24, 28] и $\text{T}(d, n)^4\text{He}$ [7, 24, 25, 28] от энергии дейтронов E_d .

Таблица 40.8

Нормированное к единице при $\theta = 0^\circ$ угловое распределение нейтронов [25] в реакции $\text{T} (d, n) ^4\text{He}$
В скобках даны истинные значения $\sigma(\theta = 0^\circ)$, мбарн/стер.

θ , град	Энергия дейтронов E_d , Мэв							
	0,20	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
0	(218) 1,000	(57,9) 1,000	(33,7) 1,000	(23,8) 1,000	(19,4) 1,000	(17,1) 1,000	(15,6) 1,000	(14,7) 1,000
15	0,998	0,996	0,997	0,996	0,993	0,989	0,980	0,966
30	0,990	0,988	0,989	0,982	0,974	0,958	0,927	0,882
45	0,980	0,972	0,974	0,958	0,941	0,910	0,861	0,806
60	0,967	0,950	0,948	0,922	0,899	0,853	0,793	0,722
75	0,951	0,923	0,913	0,877	0,844	0,791	0,730	0,658
90	0,934	0,890	0,870	0,825	0,786	0,730	0,671	0,597
105	0,918	0,856	0,824	0,769	0,727	0,673	0,618	0,548
120	0,903	0,823	0,777	0,717	0,673	0,624	0,570	0,511
135	0,890	0,794	0,737	0,671	0,629	0,586	0,536	0,485
150	0,880	0,770	0,705	0,635	0,594	0,558	0,510	0,464
165	0,875	0,757	0,683	0,613	0,572	0,541	0,496	0,450
180	0,873	0,750	0,677	0,606	0,564	0,535	0,492	0,445

θ , град	Энергия дейтронов E_d , Мэв							
	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	6,00	7,00
0	(15,0)	(16,4)	(18,4)	(20,7)	(22,9)	(24,5)	(25,8)	(25,7)
	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
7,5	0,981	0,976	0,966	0,960	0,956	0,950	0,937	0,923
15	0,931	0,910	0,876	0,859	0,842	0,821	0,781	0,737
22,5	0,860	0,821	0,760	0,726	0,698	0,661	0,591	0,509
30	0,790	0,733	0,650	0,603	0,564	0,518	0,440	0,344
45	0,678	0,602	0,504	0,443	0,399	0,361	0,317	0,297
60	0,601	0,517	0,418	0,355	0,314	0,289	0,283	0,284
75	0,536	0,438	0,338	0,274	0,230	0,206	0,197	0,201
90	0,479	0,379	0,286	0,222	0,182	0,156	0,137	0,125
105	0,443	0,356	0,284	0,225	0,194	0,171	0,143	0,128
120	0,427	0,356	0,302	0,251	0,231	0,208	0,176	0,156
135	0,415	0,355	0,315	0,271	0,255	0,227	0,187	0,167
150	0,404	0,351	0,317	0,281	0,262	0,229	0,186	0,167
165	0,395	0,346	0,318	0,286	0,263	0,226	0,186	0,168
180	0,391	0,346	0,319	0,288	0,263	0,224	0,185	0,169

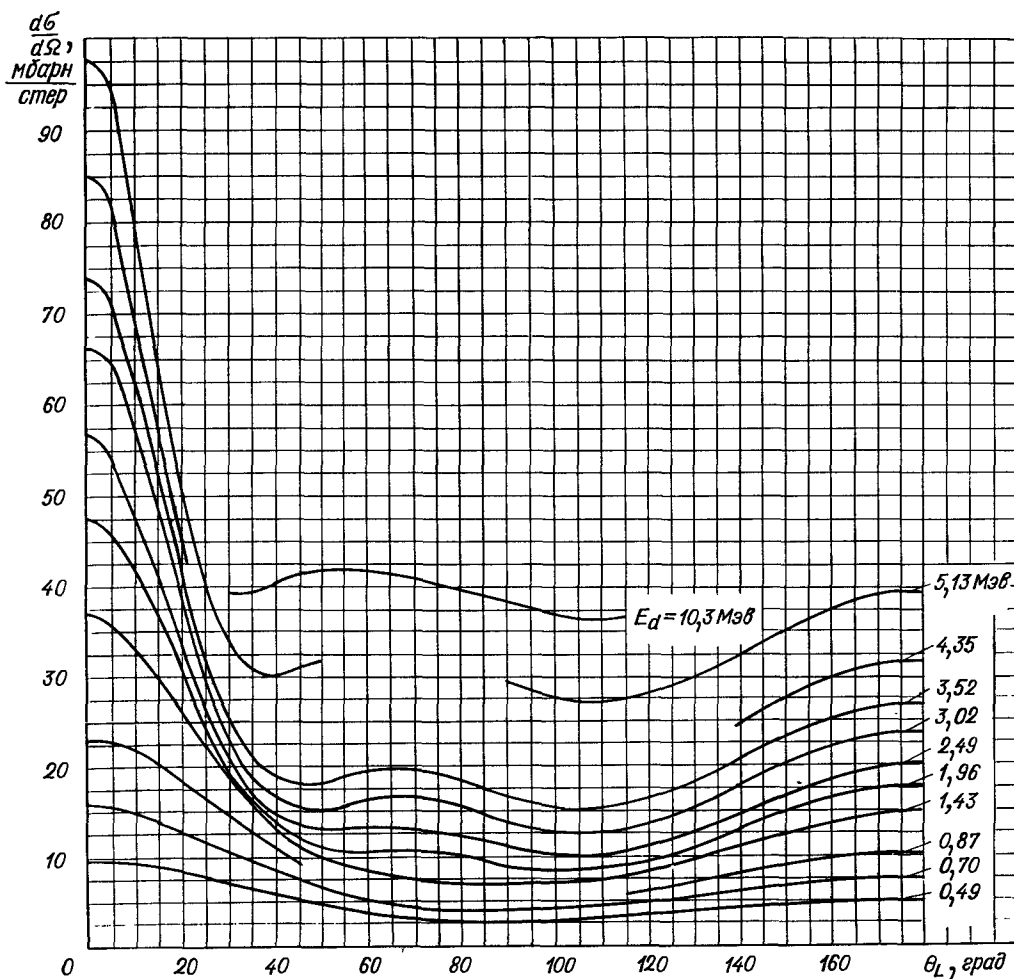


Рис. 40.11. Зависимость дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ реакции $D(d, n)^3\text{He}$ от угла разлета нейтронов θ_L в лабораторной системе координат [24].

Рис. 40.12. Зависимость выхода нейтронов из толстых мишеней для реакции (d, n) от энергии дейтона E_d [7]: 1 — мишень $^3\text{H} - \text{Zr}$; 2 — мишень ^9Be ; 3 — мишень D_2O (лед).

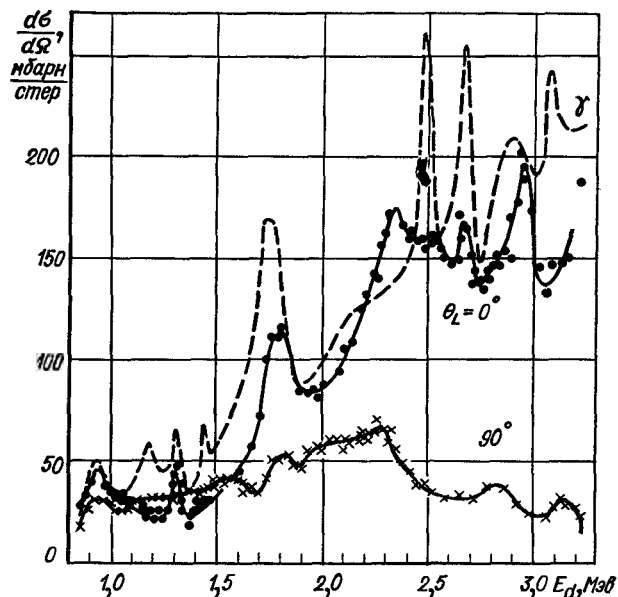
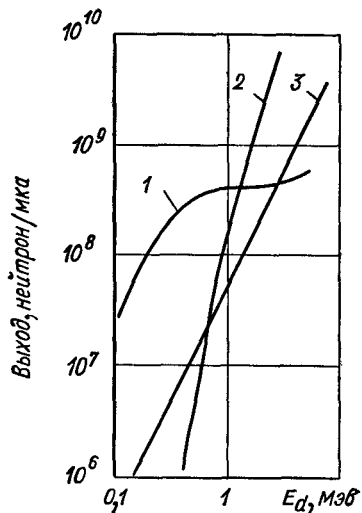


Рис. 40.13. Зависимость дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ реакции $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$ при углах вылета нейтронов 0 и 90° в лабораторной системе координат от энергии дейтона [19]. Штриховой линией показана кривая выхода γ -квантов в относительных единицах.

40.5. РЕАКЦИИ (α, n)

Реакции (α, n) часто используются для получения нейтронов с энергиями порядка нескольких мегаэлектронвольт. Источником нейтронов обычно служит смесь α -излучателя и какого-либо легкого элемента: Be, В, F и т. п. Источники имеют размеры $\sim 1-3$ см и содержат до нескольких десятков кюри α -радиоактивного препарата [2]. Источники, содержащие ^{210}Po и ^{238}Pu , характерны тем, что имеют низкую мощность

γ -излучения, приблизительно в 1000 раз меньшую, чем у источников на основе Ra с эквивалентной интенсивностью нейтронов [2].

Для α -частиц ^{210}Po реакция образования нейтронов с мишенью из бериллия происходит согласно уравнению

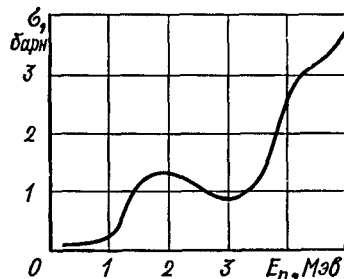
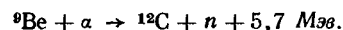


Рис. 40.14. Зависимость сечения реакции $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ от энергии α -частиц [7].

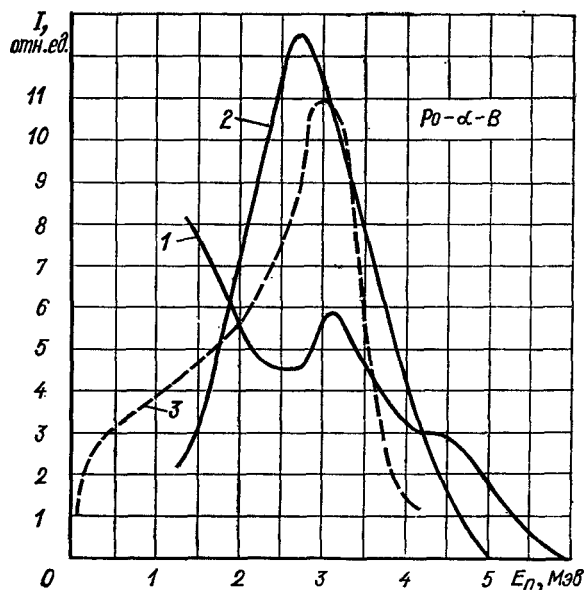


Рис. 40.15. Спектр Po- α -В-источника нейтронов [6]: 1 — Po- α - ^{10}B ; 2 — Po- α - ^{11}B ; 3 — естественная смесь изотопов. По оси ординат отложена интенсивность I ; по оси абсцисс — энергия нейтронов.

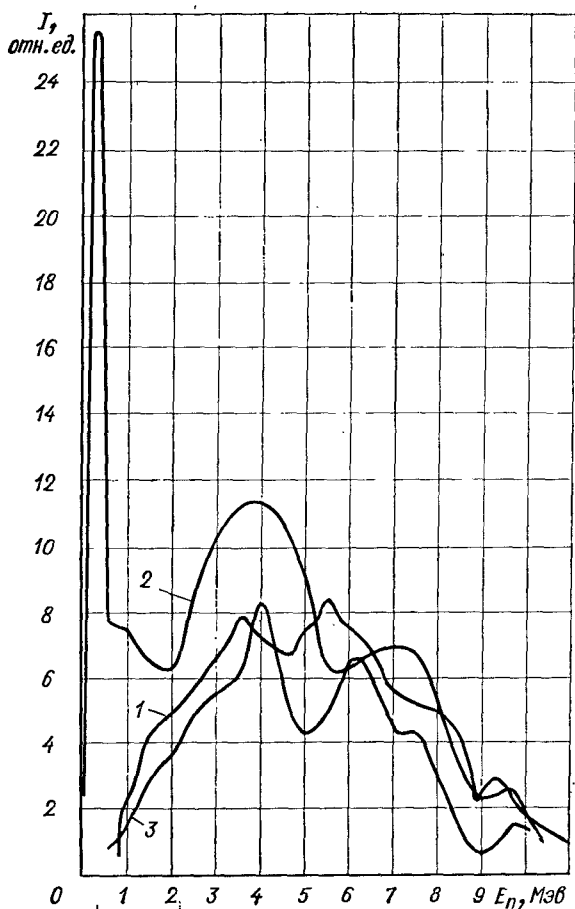


рис. 40.16. Спектры Po-α-Be различных источников нейтронов:
 1 — Po-α-Be [2]; 2 — Pu-α-Be [2, 26]; 3 — Ra-α-Be [2].
 По оси ординат отложена интенсивность I ; по оси абсцисс — энергия нейтронов E_n .

Таблица 40.10

Выход нейтронов из толстых Po-мишеней при бомбардировке их α-частицами [6]

Мишень	Выход, нейтрон/ 10^6 α-частиц	Мишень	Выход, нейтрон/ 10^6 α-частиц
Li	2,6	Na	1,50
Be	80,0	Mg	1,40
B	24,0	Al	0,25
C	0,11	Si	0,16
N	0,01	Cl	0,11
O	0,07	Ar	0,38
F	12,0		

Таблица 40.11

Параметры резонансов реакции $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}[30]$

E_α — энергия α-частиц, при которой имеет место резонанс; Γ — ширина резонанса; $\sigma(\theta_L)$ — дифференциальное сечение рассеяния в лабораторной системе координат.

E_α , МэВ	Γ , кэВ	$\sigma(\theta_L)$, мбарн/стер	
		$0^\circ < \theta_L < 10^\circ$	$80^\circ < \theta_L < 100^\circ$
2,09	100	2,7	4,6
2,25	100	6,7	6,2
2,42	80	14	6,8
2,605	≤ 6	≥ 12	≥ 15
2,69	10	24	10
2,775	10	10	7,5
2,825	≤ 7	≥ 36	≥ 20
3,09	90	9,1	4,3
3,33	150	20	7,6
3,42	30	17	7,4
3,67	≤ 8	$\geq 3,5$	$\geq 2,1$
3,73	≤ 5	≥ 17	≥ 8
4,125	15	7,4	2,8
4,42	25	28	5,7
4,50	70	6	—
4,63	15	38	9,1
4,75	200	6,8	3,5
5,05	65	30	9,5

Таблица 40.9

Выход нейтронов из толстых Be и В мишеней [6]

α-Излучатель	Энергия α-частиц E , МэВ	Выход, нейтрон/ 10^6 α-частиц	
		В-мишень	Be-мишень
U	4,18	—	40,
Ra	4,791	15	55
RaA(^{218}Po)	5,998	40	120
RaC(^{214}Po)	7,680	100	200
RaF(^{210}Po)	5,298	24	80
Rn	5,486	30	90
$^{239}\text{Pu}[2]$	5,1	—	40
$^{241}\text{Am}[2]$	5,4	—	50 ÷ 70

Таблица 40.12

Эnergии резонанса или порога E ,
используемые для калибровки пучков ускорителей [10]

Реакция	E , кэв	Ширина резонанса Γ , кэв
$^{11}\text{B}(p, \gamma)^{12}\text{O}$	$163,1 \pm 0,5$	$6,3 \pm 1,0$
$^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$	$340,5 \pm 0,2$	$2,7 \pm 0,4$
$^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$	$992,0 \pm 0,5$	$0,08 \pm 0,04$
$^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$	$872,4 \pm 0,4$	$4,5 \pm 0,3$
$^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$	$1880,7 \pm 0,4$	—
$^7\text{Li}(p, \gamma)^8\text{Be}$	$441,2 \pm 0,3$	$12,2 \pm 0,5$
$^9\text{Be}(p, \gamma)^{10}\text{B}$	$1083,9 \pm 0,6$	$3,8 \pm 0,5$
$^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$	$1346,6 \pm 1,1$	5 ± 1
$^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$	$1373,5 \pm 0,6$	11 ± 1
$^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$	$1746,5 \pm 0,5$	$0,077 \pm 0,012$
$^{58}\text{Ni}(p, \gamma)^{59}\text{Co}$	$1843,2 \pm 0,5$	$0,1 \pm 0,05$
$^9\text{Be}(p, \alpha\gamma)^6\text{Li}$	$2564,6 \pm 1,8$	39 ± 2
$^{13}\text{C}(p, n)^{13}\text{N}$	$3235,8 \pm 1,1$	—
$\text{Tl}(p, n)^3\text{He}$	$1019,7 \pm 0,5$	—
$^{58}\text{Ni}(p, \gamma)^{59}\text{Co}$	$1424,1 \pm 0,7$	$0,05 \pm 0,05$
$^{16}\text{O}(d, n)^{17}\text{F}$	$1829,2 \pm 0,6$	—
$^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$	$2573,4 \pm 0,8$	—
$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$	2800 ± 3	4
$^{28}\text{Si}(p, p'\gamma)^{28}\text{Si}$	3105 ± 6	12
$^{28}\text{Si}(p, p'\gamma)^{28}\text{Si}$	3340 ± 7	12
$^{23}\text{Na}(\alpha, n)^{26}\text{Al}$	3492 ± 3	1
$^{15}\text{N}(p, n)^{15}\text{O}$	$3780,8 \pm 1,1$	—
$^{19}\text{F}(p, n)^{19}\text{Ne}$	4233 ± 2	—
$^{28}\text{Si}(p, p'\gamma)^{28}\text{Si}$	4240 ± 8	16
$^{28}\text{Si}(p, p'\gamma)^{28}\text{Si}$	4887 ± 10	12

Таблица 40.13

Эnergии γ -квантов, используемых для калибровки
гамма-спектрометров

Источник	Эnergия резонанса, кэв	E_γ , Мэв	Литература
$^{11}\text{B}(p, p'\gamma)^{11}\text{B}$	—	2,14	[29]
$^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$	456	2,37	[29]
$^{12}\text{C}(d, p)^{13}\text{C}$	—	3,097	[30]
$^9\text{Be}(p, \alpha\gamma)^6\text{Li}$	2565	3,57	[30]
$^{15}\text{N}(p, \alpha\gamma)^{12}\text{C}$	1650	4,43	[31]
$^{11}\text{B}(p, \gamma)^{12}\text{C}$	163	4,43	[32]
$^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$	340; 1348	6,13	[33]
$^9\text{Be}(p, \gamma)^{10}\text{B}$	1080	6,84	[37]
$^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$	554	8,06	[34]
$^{19}\text{F}(p, \gamma)^{20}\text{Ne}$	669	11,67	[35]
$^{15}\text{N}(p, \gamma)^{16}\text{O}$	1050	13,13	[36]

1. Экспериментальная ядерная физика. Под ред. Э. Сегре. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1955.
2. Кёртис Л. Введение в нейтронную физику. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1965.
3. Bendel W. L. e. a. "Phys. Rev.", 1958, v. 111, p. 1297.
4. Geller K. N. e. a. "Phys. Rev.", 1960, v. 118, p. 1302.
5. Reinhasdt G. C., Whitehead W. D. "Nucl. Phys.", 1962, v. 30, p. 201.
6. Физика ядерных реакторов. Под ред. И. А. Стенбока. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1964.
7. Бекури К., Виртц К. Нейтронная физика. Пер. с нем. М., Атомиздат, 1968.
8. Вейнберг А., Вигнер Е. Физическая теория ядерных реакторов. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
9. Takayanagi S. "Nucl. Phys.", 1961, v. 28, p. 494.
10. Marion J. B. "Revs Mod. Phys.", 1961, v. 33, p. 139; 1961, v. 33, p. 623.
11. Kington J. D. e. a. "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 1393.
12. Nelson J. W. e. a. "Phys. Rev.", 1962, v. 125, p. 2005.
13. Holland R. E., Lynch F. J. "Phys. Rev.", 1959, v. 113, p. 903.
14. Brugger R. M. e. a. "Phys. Rev.", 1955, v. 100, p. 84.
15. Gossett C. R., Butler J. W. "Phys. Rev.", 1959, v. 113, p. 246.
16. Chapman R. A., Slattery J. C. "Phys. Rev.", 1957, v. 105, p. 633.
17. Tohnson C. H. "Phys. Rev.", 1958, v. 109, p. 1243.
18. Marion J. B. "Phys. Rev.", 1956, v. 103, p. 713.
19. Bailey C. L. e. a. "Phys. Rev.", 1948, v. 73, p. 274.
20. MacKlin R. L., Gibbons J. H. "Phys. Rev.", 1958, v. 109, p. 105.
21. Bevington P. "Phys. Rev.", 1961, v. 121, p. 871.
22. Gibbons J. "Phys. Rev.", 1959, v. 114, p. 571.
23. Jones K. W. e. a. "Phys. Rev.", 1958, v. 112, p. 1252.
24. Fowler J. L., Brolley J. E. "Revs Mod. Phys", 1956, v. 28, p. 103.
25. Bame S. J. e. a. "Phys. Rev.", 1957, v. 107, p. 1616.
26. Frank A. L., Arakawa E. T., Birkhoff R. D. "Phys. Rev.", 1962, v. 126, p. 1794.
27. Jarvis G. "Phys. Rev.", 1950, v. 79, p. 929.
28. Arnold W. R. e. a. "Phys. Rev.", 1954, v. 93, p. 483.
29. Woodbury H. H. e. a. "Phys. Rev.", 1954, v. 93, p. 1311.
30. Mackin R. J. "Phys. Rev.", 1954, v. 94, p. 648.
31. Kraus A. A. "Phys. Rev.", 1954, v. 94, p. 975.
32. Segel R. E., Bina M. J. "Phys. Rev.", 1961, v. 124, p. 814.
33. Hornyak W. F., Coor T. "Phys. Rev.", 1953, v. 92, p. 675; Hunt S. E., Pope R. A., Evans W. W. "Phys. Rev.", 1957, v. 106, p. 1012.
34. Hird B. e. a. "Phys. Rev.", 1954, v. 96, p. 702.
35. Hane J. V. e. a. "Phys. Rev.", 1960, v. 120, p. 952.
36. Bashkin S., Carlson R. R. "Phys. Rev.", 1957, v. 106, p. 261.
37. Sprenkel E. L., Daughtry J. W. "Phys. Rev.", 1961, v. 124, p. 854.

ПРОХОЖДЕНИЕ НЕЙТРОНОВ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

41.1. СЕЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕЙТРОНОВ

С ВЕЩЕСТВОМ ДЛЯ НЕЙТРОНОВ ТЕПЛОВЫХ ЭНЕРГИЙ

Радиационный захват нейтронов — реакция, в которой ядро ${}^A_ZN$, захватывая нейтрон, превращается в ядро ${}^{A+1}_ZN$, а высвобождающаяся энергия испускается в виде γ -квантов. При малых энергиях снятие возбуждения ядра может происходить путем передачи возбуждения одному из внутренних электронов оболочки атома (электроны внутренней конверсии), а при энергиях возбуждения $E^* > 2m_e c^2$ ($m_e c^2 = 511$ кэв) возможно образование пары электрон — позитрон.

Ядро ${}^{A+1}_ZN$ образуется в возбужденном состоянии, причем энергия возбуждения равна

$$E^* = \frac{M_A}{M_A + M_n} E_n + B_n,$$

где M_A и M_n — массы ядра ${}^A_ZN$ и нейтрона; E_n — кинетическая энергия нейтрона; B_n — энергия связи последнего нейтрона в ядре ${}^{A+1}_ZN$. Энергия связи нейтронов B_n обычно равна 7–8 Мэв.

Радиационный захват нейтронов — реакция экзотермическая, поэтому принципиально она возможна при любых энергиях нейтронов и практически на всех ядрах. Для тепловых нейтронов энергия испускаемых γ -квантов E_γ может достигать 10–12 Мэв.

Возбужденное состояние ядра имеет конечное время жизни τ , определяющее время распада данного состояния, и связанную с ним парциальную ширину энергетического уровня $\Gamma = \hbar/\tau$. Для медленных нейтронов $\Gamma \approx 0,1$ эв и, следовательно, $\tau \approx 10^{-14}$ сек.

Для тепловых нейтронов сечение радиационного захвата $\sigma(n, \gamma)$ в большинстве случаев $\sim 1/\sqrt{E_n}$. В резонансной области сечение $\sigma(n, \gamma)$ описывается формулой Брейта — Вигнера и в максимуме может значительно превышать геометрические размеры ядра. Сечение радиационного захвата быстрых нейтронов $\sigma(n, \gamma) \approx \pi a^2 \Gamma_\gamma / \Gamma$, где a — величина, характеризующая радиус ядра. Радиационный захват медленных нейтронов ядрами известен как реакция, благодаря которой стало доступным большое число радиоактивных изотопов.

Упругое рассеяние нейтронов в общем случае есть результат интерференции потенциального и резонансного рассеяний. При потенциальном рассеянии процесс происходит без образования составного ядра. Резонансное рассеяние происходит через стадию промежуточного ядра.

Для медленных нейтронов длина волны нейтрона λ много больше радиуса ядра a , и преобладает рассеяние нейтронов с орбитальным квантовым числом $l = 0$ (S-рассеяние), сферически-симметричное в системе центра масс. Для более высоких энергий нейтронов становится возможным рассеяние с $l = 1$ (P-рассеяние).

Для большинства наблюдаемых резонансов кинетическая энергия нейтрона не велика и рассеиваются нейтроны с $l = 0$; кроме того, в этой области существенное значение имеют лишь реакции (n, n) и (n, γ) , поэтому $\Gamma = \Gamma_n + \Gamma_\gamma$. Выражение для сечения реакции (n, n) в этом случае имеет вид

$$\sigma(n, n) = \pi \lambda^2 g \left| \frac{\Gamma_n}{(E - E_0) + i\Gamma/2} + \frac{2a}{\lambda} \right|^2 + 4\pi a^2 (1 - g),$$

где g — статистический вес, $g = [1 \pm 1/(2I \pm 1)]/2$, I — спин ядра мишени; a — радиус ядра; $2\pi\lambda$ — длина волны падающего нейтрона.

При очень больших энергиях нейтрона ($\lambda \ll a$) интерференционные явления исчезают, и сечение реакции $\sigma(n, n) \approx \pi(a + \lambda)^2$.

В табл. 41.1 представлены экспериментальные данные по сечениям поглощения для нейтронов со скоростью $v = 2200$ м/сек. Значения, отмеченные звездочкой, получены в измерениях с реакторными нейтронами, имеющими спектр, близкий к распределению Максвелла.

В четвертой колонке даны сечения захвата σ_γ . Рядом со значением сечения указан тип реакции (n, α) или (n, p) . Обозначения отсутствуют в случае радиационного захвата — реакции (n, γ) , преобладающей для ядер с массовым числом $A > 35$. Для ядер с порядковым номером $Z \geq 88$ в этой колонке приведены полные сечения поглощения $\sigma(n, a)$, которые кроме указанных выше процессов могут включать еще сечение реакции деления $\sigma(n, f)$.

Сечения активации $\sigma_{акт}$ определялись по радиоактивности облученного образца с последующим β -распадом. Иногда сечения активации указаны для отдельных изомерных состояний, причем первым в таблице помещено значение $\sigma_{акт}$ наиболее возбужденного состояния. Там же указаны периоды полураспада образующихся β -активных веществ.

Если энергия нейтрона мала по сравнению с энергией первого резонансного уровня, то сечение реакции (n, a) обычно меняется по закону $1/v$: $\sigma(v) = \sigma_0/v$, где σ_0 — некоторая константа. В этом случае усредненное сечения по максвелловскому спектру $n(v)$ приводит к

$$\bar{\sigma} = \frac{\int \frac{\sigma_0}{v} n(v) v dv}{\int n(v) v dv} = \frac{\sigma_0}{\bar{v}},$$

где $\bar{v}$ — среднее значение скорости; $v = \left(\frac{8kT}{\pi m} \right)^{1/2}$.

(Следует отметить, что усреднение сечения на самом деле производится по потоку $n(v) \cdot v$. Однако получаемое значение $\bar{\sigma}$ используется в подавляющем большинстве расчетов.)

Усредненное сечение $\bar{\sigma}$ можно связать со значением сечения $\sigma_{н.в.}$ — при наиболее вероятной скорости $v_{н.в.} = \sqrt{\pi} \bar{v}/2$. Поскольку $\sigma_{н.в.} \cdot v_{н.в.} = \sigma_0$, то

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_{н.в.} v_{н.в.}}{\bar{v}} = \frac{\sigma_{н.в.}}{1,128} = \frac{\sigma(kT)}{1,128} = \frac{\sigma_{2200}}{1,128},$$

где kT — энергия, соответствующая наиболее вероятной скорости. При $T = 293^\circ\text{K}$ $v_{н.в.} = 2200$ м/сек.

Для сечений, не подчиняющихся закону $1/v$, указан

f -фактор отклонения от этого закона: $\bar{\sigma} = \frac{\sigma(kT)}{1,128} f(kT)$.

В шестой колонке приведены средние сечения рассеяния $\bar{\sigma}_{рас}$, полученные экспериментально, для максвелловского спектра нейтронов. Отметим, что на величину $\bar{\sigma}_{рас}$ влияет кристаллическая структура образцов (и даже размеры кристаллических зерен), с которыми производились измерения.

Сечения поглощения, активации и рассеяния для нейтронов
тепловых энергий [1,2]

Элемент	Массовое число	Содержание, %; пе- риод полураспада	σ_T , барн	$\sigma_{\text{акт}}$, барн; период полураспада образу- ющегося β -излучателя	$\bar{\sigma}$ рас. барн
^1H	1 2	99,985 0,015	$(332 \pm 2) 10^{-3}$ $(0,46 \pm 0,10) 10^{-3}$	— $(0,57 \pm 0,01) 10^{-3}$; 12,4 лет	38 ± 4 (газ) 7 ± 1
^2He	3 4	Естеств. 0,00013 100 %	— $5400 \pm 200 (n, p)$ 0	— — 0	$0,8 \pm 0,2$ $1,0 \pm 0,7$ —
^3Li	6 7	Естеств. 7,52 92,48	$71 \pm 1,0$ $945 (n, \alpha)$ —	— $(28 \pm 8) 10^{-3}$ 36 ± 4 ; 0,89 сек	$1,4 \pm 0,3$ — —
^4Be	7 9	54 дня 100	$54\,000 \pm 8000 (n, p)$; $< 1(n, \alpha) (10 \pm 1) 10^{-3}$	— $(9 \pm 3) 10^{-3}$; $2,7 \cdot 10^6$ лет	— 7 ± 1
^5B	10 11	Естеств. 19,8 80,2	$757,7 \pm 3,08$ 3838 ± 15 ; $(n, p) < 0,2$ —	— $0,5 \pm 0,2$ $(5 \pm 3) 10^{-3}$; 0,03 сек	4 ± 1 — —
^6C	12 13 14	Естеств. 98,89 1,11 5570 лет	$(3,80 \pm 0,04) 10^{-3}$ — $(0,5 \pm 0,2) 10^{-3}$ < 200	— $(3,3 \pm 0,2) 10^{-3}$ $(0,9 \pm 0,3) 10^{-3}$; 5570 лет $< 10^{-6}$; 2,4 сек	$4,8 \pm 0,2$ — — —
^7N	14 15	Естеств. 99,63 0,37	$1,88 \pm 0,05$ $0,08 \pm 0,02$; $1,75 \pm 0,05 (n, p)$ —	— — $(24 \pm 8) 10^{-3}$; 7,4 сек	10 ± 1 — —
^8O	16 17 18	Естеств. 99,76 0,037 0,204	$< 0,0002$ — $0,25 \pm 0,15 (n, \alpha)$ —	— — $0,4 \pm 0,1$; 5570 лет ^{14}C $(0,21 \pm 0,04) 10^{-3}$; 29 сек	$4,2 \pm 0,3$ — — —
^9F	19	100	$< 10^{-2}$	$(9 \pm 2) 10^{-3}$; 11 сек	$3,9 \pm 0,2$
^{10}Ne	20 21 22	Естеств. 90,92 0,26 8,82	$(32 \pm 9) 10^{-3}$ — — —	— — — $(36 \pm 15) 10^{-3}$; 40 сек	$2,38 \pm 0,04$ — — —
^{11}Na	23	100	$(525 \pm 10) 10^{-3}$	$0,534 \pm 0,007$; 14,95 ч	$4,0 \pm 0,5$
^{12}Mg	24 25 26 27	Естеств. 78,60 10,11 11,29 9,5 мин	$0,069 \pm 0,002$ $0,034 \pm 0,010$ $0,280 \pm 0,090$ $(60 \pm 60) 10^{-3}$	— — — $(27 \pm 5) 10^{-3}$; 9 мин $3 \cdot 10^{-2*}$; 21 ч	$3,6 \pm 0,4$ — — —
^{13}Al	27	100	$(241 \pm 3) 10^{-3}$	$(0,21 \pm 0,02) 10^{-3}$; 2,3 мин	$1,4 \pm 0,1$
^{14}Si	28 29 30	Естеств. 92,27 4,68 3,05	$0,16 \pm 0,02$ $(80 \pm 30) 10^{-3}$ $0,28 \pm 0,09$ $0,4 \pm 0,4$	— — — $(110 \pm 10) 10^{-3}$; 2,62 ч	$1,7 \pm 0,3$ — — —
^{15}P	31	100	$0,20 \pm 0,02$	$0,19 \pm 0,010$	5 ± 1

Элемент	Массовое число	Содержание, %; период полураспада	σ_{γ} , барн	$\sigma_{\text{акт}}$, барн; период полураспада образующегося β -излучателя	$\sigma_{\text{рас}}$, барн
^{16}S		Естеств.	$0,52 \pm 0,02$	—	$1,1 \pm 0,2$
	32	95,018	$(1,8 \pm 1,0) \cdot 10^{-3}$ (n, α)	—	—
	33	0,75	$0,125 \pm 0,100$ (n, p); (n, α) < 8	$(15 \pm 10) \cdot 10^{-3}$; 25,1 дня ^{33}P	—
	34	4,215	—	$0,26 \pm 0,05$; 87 дней	—
	35	0,017	—	$0,14 \pm 0,04$; 5 мин	—
^{17}Cl	35	Естеств. 75,4	$31,0 \pm 2,0$ $< 5 \cdot 10^{-5}$ (n, α) $0,30 \pm 0,10$ (n, p)	— 30 ± 20 ; $3,08 \cdot 10^8$ лет $< 5 \cdot 10^{-5}$; 14,3 дня ^{32}P $0,19 \pm 0,05$; 87 дней ^{35}S	16 ± 3 —
	36	$3,08 \cdot 10^8$ лет	—	90 ± 30	—
	37	24,6	—	$(5 \pm 3) \cdot 10^{-3}$; 1,0 сек $(0,56 \pm 0,12) \cdot 10^{-3}$; 37,5 мин	—
^{18}Ar	36	Естеств. 0,34	$0,61 \pm 0,03$	—	$1,5 \pm 0,5$
	38	0,063	—	6 ± 2 ; 35 дней	—
	40	99,60	—	$0,8 \pm 0,2$; 265 лет	—
	41	109 мин	—	$0,53 \pm 0,02$; 109 мин	—
				$> 0,06$; 3,5 года	—
^{19}K	39	Естеств. 93,08	$2,07 \pm 0,06$ $1,94 \pm 0,15$	—	$1,5 \pm 3$
	40	0,012	$3,8 \pm 0,7$; 70 ± 20 (n, p)	$3 \pm 2^*$; $1,3 \cdot 10^9$ лет	—
	41	6,91	$1,24 \pm 0,10$	—	—
				$1,30 \pm 0,1$; 12,46 ч	—
^{20}Ca	40	Естеств. 96,97	$0,44 \pm 0,02$	—	—
	42	0,64	$0,22 \pm 0,04$	—	—
	43	0,145	42 ± 3	—	—
	44	2,06	—	—	—
	46	0,0033	—	$0,72 \pm 0,10$; 164 дня	—
	48	0,185	—	$0,25 \pm 0,10$; 4,8 дня	—
				$1,1 \pm 0,1$; 8,5 мин	—
^{21}Sc	45	100	$28,3 \pm 0,7$	10 ± 4 ; 20 сек $22,3 \pm 2,2$; 85 дней	24 ± 2
^{22}Ti	46	Естеств.	$6,9 \pm 0,13$	—	4 ± 1
	47	7,95	$0,6 \pm 0,2$	—	2 ± 2
	48	73,45	$1,7 \pm 0,3$	—	4 ± 1
	49	5,51	$8,3 \pm 0,6$	—	4 ± 2
	50	5,34	$1,9 \pm 0,5$	—	1 ± 1
			$< 0,2$	$0,14 \pm 0,03$; 5,8 мин	3 ± 1
^{23}V	50	Естеств. 0,24	$5,00 \pm 0,01$	—	5 ± 1
	51	99,76	250 ± 200	—	—
			—	$4,5 \pm 0,9$; 3,76 мин	—
^{24}Cr	50	Естеств. 4,31	$3,1 \pm 0,2$	—	$3,0 \pm 0,5$
	52	83,76	$17,0 \pm 1,4$	$15,9 \pm 1,6$; 27,7 дня	—
	53	9,55	$0,76 \pm 0,06$	—	—
	54	2,38	$18,2 \pm 1,5$	—	—
			$< 0,3$	$0,38 \pm 0,04$; 3,6 мин	—
^{25}Mn	55	100	$13,2 \pm 0,4$	$13,17 \pm 0,1$; 2,58 ч	$2,3 \pm 0,3$
^{26}Fe	54	Естеств. 5,84	$2,62 \pm 0,06$; $< 5 \cdot 10^{-3}$ (n, α)	—	11 ± 1
	56	91,68	$2,3 \pm 0,2$	$2,8 \pm 0,4$; 2,94 года	—
	57	1,17	$2,7 \pm 0,2$	—	—
	58	0,31	$2,5 \pm 0,2$	—	—
			$2,5 \pm 2,0$ (n, α) $< 1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,01 \pm 0,1$; 44,3 дня $< 1,5 \cdot 10^{-3}$; 3,5 мин ^{55}Cr	—

Элемент	Массовое число	Содержание, %; период полураспада	σ_T , барн	$\sigma_{\text{акт}}$, барн; период полураспада образующегося β -излучателя	$\sigma_{\text{рас}}$, барн
²⁷ Co	59	100	$38,0 \pm 0,5$	16 ± 3 ; 10,4 мин 20 ± 3 ; 5,28 года 100 ± 50 ; 1,75 ч 6 ± 2 ; 1,75 ч	7 ± 1 — —
	60	10,4 мин	—	—	—
	60	5,28 года	—	—	—
²⁸ Ni		Естеств.	$4,6 \pm 0,2$	—	$17,5 \pm 1,0$
	58	67,76	$4,4 \pm 0,3$	—	—
	60	26,16	$2,6 \pm 0,2$	—	—
	61	1,25	$2,0 \pm 1,0$	—	—
	62	3,66	15 ± 2	—	—
	64	1,16	—	$1,52 \pm 0,14$; 2,57 ч	—
	65	2,57 ч	—	20 ± 2 ; 56 ч	—
²⁹ Cu		Естеств.	$3,85 \pm 0,03$	—	$7,2 \pm 0,7$
	63	69,1	$4,5 \pm 0,1$	$4,5 \pm 0,2$; 12,9 ч	—
	65	30,9	$2,2 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,4$; 5,15 мин	—
	66	5,51 мин	—	$130 \pm 40^*$; 59 ч	—
³⁰ Zn		Естеств.	$1,10 \pm 0,02$ $(1,5 \pm 1) 10^{-5}$ (n, α)	—	$3,6 \pm 0,4$
	64	48,89	—	$0,47 \pm 0,05$; 246 дней $< 10^{-5}$; 12,8 ч ⁶⁴ Cu $2 \cdot 10^{-6}$; 80 лет ⁶⁸ Ni	—
	66	27,81	$< 2 \cdot 10^{-5}$ (n, α)	—	—
	67	4,11	$(6 \pm 4) 10^{-6}$ (n, α)	—	—
	68	18,56	$< 2 \cdot 10^{-5}$ (n, α)	$(9,9 \pm 1) 10^{-2}$; 13,8 ч $1,0 \pm 0,2$; 52 мин	—
	70	0,62	—	85 ± 20 ; 2,2 мин	—
³¹ Ga		Естеств.	$2,80 \pm 0,13$	—	4 ± 1
	69	60,2	$2,1 \pm 0,2$	$1,4 \pm 0,3$; 20,2 мин	—
	71	39,8	$5,1 \pm 0,4$	$5,0 \pm 0,5$; 14,2 ч	—
³² Ge		Естеств.	$2,45 \pm 0,20$	—	3 ± 1
	70	20,55	$3,4 \pm 0,3$	$3,42 \pm 0,35$; 12 дней	—
	72	27,37	$0,98 \pm 0,09$	—	—
	73	7,67	14 ± 1	—	—
	74	36,74	$0,62 \pm 0,06$	$0,04 \pm 0,008$; 48 сек $0,21 \pm 0,08$; 82 мин	—
	76	7,67	$0,36 \pm 0,07$	$(8,0 \pm 2,0) 10^{-2}$; 57 сек 50 ± 10 ; 12 ч	—
³³ As	75	100	$4,3 \pm 0,2$	$5,4 \pm 1,0$; 27 ч	6 ± 1
³⁴ Se		Естеств.	$11,7 \pm 0,1$	—	11 ± 2
	74	0,87	50 ± 7	26 ± 6 ; 123 дня	—
	76	9,02	85 ± 7	7 ± 3 ; 18 сек	—
	77	7,58	42 ± 4	—	—
	78	23,52	$0,4 \pm 0,4$	—	—
	80	49,82	$0,61 \pm 0,06$	$(3,0 \pm 1,0) 10^{-2}$; 57 мин $0,5 \pm 0,1$; 18 мин	—
	82	9,19	$2,1 \pm 1,5$	$(5,0 \pm 2,5) 10^{-2}$; 67 сек $(4 \pm 2) 10^{-3}$; 25 мин	—
³⁵ Br		Естеств.	$6,82 \pm 0,06$	—	6 ± 1
	79	50,52	$10,4 \pm 1,0$	$2,9 \pm 0,5$; 4,6 ч $8,5 \pm 1,4$; 18 мин	—
	81	49,48	$2,6 \pm 0,4$	$3,3 \pm 0,4$; 35,9 ч	—
³⁶ Kr		Естеств.	31 ± 2	—	$7,2 \pm 0,7$
	78	0,35	—	$2,0 \pm 0,5$; 34,5 ч	—
	80	2,27	95 ± 15 ; 13 сек $\rightarrow 2 \cdot 10^4$ лет	—	—
	82	11,56	45 ± 15	—	—
	83	11,55	205 ± 30	—	—

Элемент	Массовое число	Содержание, %: период полураспада	σ_{γ} , барн	$\sigma_{\text{акт}}$, барн; период полураспада образующегося β -нуклеида	$\sigma_{\text{рас}}$, барн
^{86}Kr	84	56,9	< 2	$0,10 \pm 0,03$; 4,4 ч $(60 \pm 20) 10^{-3}$; 9,4 года	—
	85	9,4 года	< 15	—	—
	86	17,37	< 2	$(60 \pm 20) 10^{-3}$; 77 мин	—
	87	77 мин	—	$< 0,6$; 2,8 ч	—
^{87}Rb	85	Естеств.	$0,73 \pm 0,07$	—	12 ± 2
	87	72,15	—	$0,91 \pm 0,08$; 18,7 дня	—
	87	27,85	—	$0,12 \pm 0,03$; 17,8 мин	—
	88	17,8 мин	—	$1,0 \pm 0,2$; 15,4 мин	—
^{88}Sr	84	Естеств.	$1,21 \pm 0,06$	—	10 ± 1
	86	0,56	< 3	< 1 ; 70 мин; $1,4 \pm 0,3$; 65 дней	—
	87	9,86	—	$1,65 \pm 0,16$; 2,80 ч	—
	88	7,02	—	—	—
	88	82,56	—	$(5 \pm 1) 10^{-3}$; 53 дня	—
	89	51 день	—	$0,5 \pm 0,1^*$; 28 лет	—
	90	19,9 года	—	$1,0 \pm 0,6$; 64 ч	—
^{89}Y	89	100	$1,31 \pm 0,08$	$1,26 \pm 0,08$; 63 ч	3 ± 2
	90	63 ч	—	< 7 ; 61 день	—
	94	58 дней	—	$1,07 \pm 0,09$; 3,5 ч	—
	94	58 дней	—	—	—
^{90}Zr	90	Естеств.	$0,185 \pm 0,004$	—	8 ± 1
	91	51,46	$0,10 \pm 0,07$	—	—
	92	11,23	$1,58 \pm 0,12$	—	—
	93	17,11	$0,25 \pm 0,12$	—	—
	93	$1,1 \cdot 10^6$ лет	$< 0,4$	—	—
	94	17,40	$0,08 \pm 0,06$	$0,036 \pm 0,008$; 63 дня	—
	96	2,80	$0,1 \pm 0,1$	$0,053 \pm 0,005$; 17 ч	—
^{91}Nb	93	100	$1,16 \pm 0,02$	$1,0 \pm 0,5$; 6,6 мин	5 ± 1
	94	$2,2 \cdot 10^4$ лет	—	15 ± 4 ; 36 дней	—
^{92}Mo	92	Естеств.	$2,7 \pm 0,4$	—	7 ± 1
	94	15,86	$< 0,3$	$6 \cdot 10^{-3}$; 6,9 ч	—
	94	9,12	—	—	—
	95	15,70	$13,9 \pm 1,4$	—	—
	96	16,50	$1,2 \pm 0,6$	—	—
	97	9,45	$2,2 \pm 0,7$	—	—
	98	23,75	$0,4 \pm 0,4$	$0,51 \pm 0,06$; 67 ч	—
	100	9,62	$0,5 \pm 0,5$	$0,20 \pm 0,05$; 14,3 мин	—
^{93}Tc	99	$2,1 \cdot 10^5$ лет	22 ± 3	$2,6 \pm 1,3$; 6 ч	—
^{94}Ru	96	Естеств.	$2,56 \pm 0,12$	—	6 ± 1
	102	5,7	—	$0,21 \pm 0,02$; 2,8 дня	—
	104	31,3	—	$1,44 \pm 0,16$; 41 день	—
	104	18,3	—	$0,7 \pm 0,2$; 4,5 ч	—
	105	4,5 ч	—	$0,2 \pm 0,02$; 1 год	—
^{95}Rh	103	100	149 ± 4	12 ± 2 ; 4,4 мин	5 ± 1
	104	4,4 мин	—	140 ± 30 ; 42 сек	—
	104	42 сек	—	800 ± 100 ; 36 ч	—
^{96}Pd	104	—	—	$40 \pm 10^*$; 36 ч	—
	102	Естеств.	$8,0 \pm 1,5$	—	$3,6 \pm 0,6$
	108	0,8	—	$4,8 \pm 1,5$; 17 дней	—
	110	26,7	—	$0,26 \pm 0,04$; 4,8 мин	—
	110	13,5	—	$10,4 \pm 0,8$; 13,6 ч	—
	110	13,5	—	$0,21 \pm 0,03$; 23,6 мин	—
				$< 0,05$; 5,5 ч	—

Элемент	Массовое число	Содержание, %; период полураспада	σ_{γ} , барн	$\sigma_{\text{акт.}}$, барн; период полураспада образующегося β -излучателя	$\sigma_{\text{рас.}}$, барн
⁴⁷ Ag	107	Естеств. 51,35	64,8±0,4 31±2	— 45±4; 2,3 мин	6±1
	109	48,65	87±7	3,2±0,4; 270 дней 113±13; 24,2 сек	—
⁴⁸ Cd	106	Естеств. 1,22	2537±9 $f=1,3$ —	— 1,0±0,5; 6,7 ч	7±1
	110	12,39	—	0,2±0,1; 49 мин	—
	112	24,07	—	(30±15) 10 ⁻³ ; 5,1 года	—
	113	12,26	20 000 $f=1,3$ —	—	—
	114	28,86	—	0,14±0,03; 43 дня 1,1±0,3; 53 ч	—
	116	7,58	—	1,5±0,3; 2,9 ч	—
⁴⁹ In	113	Естеств. 4,23	194±2	— 56±12; 49 дней	2,2±0,5
	115	95,77	—	2,0±0,6; 72 сек	—
			—	155±10; 54,2 мин 52±6; 13 сек	—
⁵⁰ Sn	112	Естеств. 0,95	(625±15) 10 ⁻³ —	— 1,3±0,3; 112 дней	4±1
	116	14,24	—	(6±2) 10 ⁻³ ; 14,5 дня	—
	117	7,57	—	—	—
	118	24,01	—	(10±6) 10 ⁻³ ; 250 дней	—
	120	32,97	—	(1±1) 10 ⁻³ ; > 400 дней	—
	122	4,71	—	0,14±0,03; 27,5 ч (1±0,5) 10 ⁻³ ; 130 дней	—
	124	5,98	—	0,16±0,04; 40 мин 0,2±0,1; 10 мин	—
			—	(4±2) 10 ⁻³ ; 10 дней	—
⁵¹ Sb	121	Естеств. 57,25	5,7±1,0 5,9±0,5	— 6,8±1,5; 2,8 дня	4,3±0,5
	123	42,75	4,1±0,3	0,19±0,03; 13,3 мин (30±15) 10 ⁻³ ; 21 мин	—
				(30±15) 10 ⁻³ ; 1,3 мин 2,5±1,5; 60 дней	—
⁵² Te	120	Естеств. 0,089	4,7±0,1 70±70	— —	5±1
	121	17 дней	24±1,0	—	—
	121	154 дня	< 1	—	—
	122	2,46	2,8±0,9	1,1±0,5; 110 дней	—
	123	0,87	410±30	—	—
	124	4,61	6,8±1,3	5±3; 58 дней	—
	125	6,99	1,56±0,16	0,8±0,2; 9,3 ч	—
	126	18,71	0,8±0,2	(90±20) 10 ⁻³ ; 110 дней 0,8±0,2; 19,3 ч	—
	128	31,79	0,3±0,3	(15±5) 10 ⁻³ ; 33 дня 0,13±0,03; 72 мин	—
	130	34,49	0,5±0,3	< 8·10 ⁻³ ; 30 ч 0,22±0,05; 25 мин	—
⁵³ I	127	100	6,22±0,15	(5,6±0,3) 10 ⁻³ ; 25 мин	3,6±0,5
	129	1,7 · 10 ² лет	32±3	24±3; 12,6 ч	—
	130	12,6 ч	—	18±3; 8,05 дня	—
	131	8,1 дня	—	50±40; 2,4 ч	—
⁵⁴ Xe	124	Естеств. 0,096	35±5 74±1*	—	4,3±0,4
	128	1,92	< 5	—	—
	129	26,44	45±15	—	—
	130	4,08	< 5	—	—
	131	21,18	120±15	—	—

Элемент	Массовое число	Содержание, %; период полураспада	σ_T , барн	$\sigma_{\text{акт}}$, барн; период полураспада образующегося β -излучателя	$\sigma_{\text{рас}}$, барн
^{54}Xe	132	26,89	< 5	$0,2 \pm 0,1$; 5,3 дня	—
	133	5,3 дня	—	190 ± 90	—
	134	10,44	< 5	$0,2 \pm 0,1$; 9,13 ч	—
	135	9,13 ч	$(2,72 \pm 0,11) 10^8$ $f = 1,16$	—	—
	136	8,87	< 5	$0,15 \pm 0,08$; 3,9 мин	—
^{55}Cs	133	100	$28,0 \pm 1,0$	$(2,44 \pm 0,15) 10^{-3}$; 3,1 ч	20 ± 10
	134	—	$41,6 \pm 0,9$	30 ± 1 ; 2,3 года	—
	^{134m}Cs	—	$2,82 \pm 0,07$	$134 \pm 12^*$ 2,6 $\cdot 10^6$ лет	—
	135	$2,6 \cdot 10^8$ лет	—	$8,7 \pm 0,5$; 13,7 года	—
	137	33 года	—	$(110 \pm 33) \cdot 10^{-3}$; 33 мин	—
^{56}Ba	—	Естеств.	$1,2 \pm 0,1$	—	8 ± 1
	130	0,101	—	$10,0 \pm 1,0$; 12 дней	—
	132	0,097	—	7 ± 2 ; 7,2 года	—
	134	2,42	2 ± 2	—	—
	135	6,59	$5,8 \pm 0,9$	—	—
	136	7,81	$0,4 \pm 0,4$	—	—
	137	11,32	$5,1 \pm 0,4$	—	—
	138	71,66	$0,70 \pm 0,10$	$0,5 \pm 0,1$; 85 мин	—
	139	85 мин	—	4 ± 1 ; 12,8 дня	—
	140	12,8 дня	—	$< 20^*$; 18 мин	—
^{57}La	—	Естеств.	$8,9 \pm 0,2$	—	15 ± 5
	139	99,911	—	$8,2 \pm 0,8$; 40 ч	—
	140	40 ч	—	$3,1 \pm 1,0$; 3,7 ч	—
^{58}Ce	—	Естеств.	$0,73 \pm 0,08$	—	9 ± 6
	136	0,19	25 ± 25	$0,6 \pm 0,2$; 34,5 ч	—
	—	—	—	$6,3 \pm 1,5$; 8,7 ч	—
	138	0,26	9 ± 6	$(7 \pm 5) 10^{-3}$; 55 сек	—
	140	88,48	$0,66 \pm 0,06$	$0,6 \pm 0,3$; 140 дней	—
	142	11,07	$1,0 \pm 0,2$	$0,31 \pm 0,10$; 32 дня	—
^{59}Pr	143	32 ч	—	$0,94 \pm 0,05$; 32 ч	—
	—	—	—	$6,0 \pm 0,7$; 290 дней	—
	141	100	$11,3 \pm 0,6$	$10,8 \pm 1,0$; 19,2 ч	—
	142	19,2 ч	—	$18 \pm 3^*$; 13,8 дня	—
^{60}Nd	143	13,8 дня	—	89 ± 10 ; 17 мин	—
	—	—	—	—	—
^{60}Nd	—	Естеств.	$49,9 \pm 0,3$	—	—
	142	27,13	18 ± 2	—	—
	143	12,32	324 ± 10	240 ± 50	—
	144	23,87	$5,0 \pm 0,6$	—	—
	145	8,29	60 ± 6	—	—
	146	17,1	10 ± 1	$1,8 \pm 0,6$; 11,3 дня	—
	148	5,72	$3,4 \pm 1,0$	$3,7 \pm 1,2$; 1,8 ч	—
	150	5,60	$3,0 \pm 1,5$	$1,5 \pm 0,2$; 15 мин	—
	—	—	—	—	—
^{61}Pm	147	2,5 года	$150 \pm 50^*$	60 ± 20 ; 5,3 дня	—
	148	—	124 ± 12	—	—
^{62}Sm	—	Естеств.	5828 ± 30 $f = 1,5$	—	—
	144	3,16	—	< 2 ; 400 дней	—
	147	15,07	87 ± 60	—	—
	149	13,84	40800 ± 3000	—	—
	151	73 года	$12400 \pm 400^*$	—	—
	152	26,63	216 ± 6	140 ± 40 ; 47 ч	—
	154	22,53	—	$5,5 \pm 1,1$; 24 мин	—

Элемент	Массовое число	Содержание, %; период полураспада	σ_I , барн	$\sigma_{\text{акт}}$, барн; период полураспада образующегося β -излучателя	$\sigma_{\text{рас}}$, барн
^{63}Eu		Естеств.	4400 ± 30 $f = 0,95$	—	8 ± 1
	151	47,77	7800 ± 200	1400 ± 300 ; 9,2 ч	—
	152	13 лет	5500 ± 1500	—	—
	153	52,23	440 ± 25	$420 \pm 100^*$; 16 лет	—
	154	16 лет	—	1500 ± 40 *; 1,7 года	—
	155	1,7 года	—	$14000 \pm 4000^*$; 15,4 дня	—
^{64}Gd		Естеств.	46617 ± 100 $f = 0,85$	—	—
	152	0,20	—	< 125 ; 230 дней	—
	154	2,15	—	—	—
	155	14,73	56200 ± 1000	$70000 \pm 20000^*$	—
	157	15,68	242000 ± 4000	$160000 \pm 60000^*$	—
	158	24,87	—	3,9 $\pm$ 0,4; 18 ч	—
	160	21,90	—	0,8 $\pm$ 0,3; 3,6 мин	—
^{65}Tb	159	100	46 ± 4	> 22 ; 73 дня	—
	160	73 дня	—	$525 \pm 100^*$; 7, дней	—
^{66}Dy		Естеств.	936 ± 20	—	100 ± 20
	158	0,090	—	96 ± 20 ; 136 дней	—
	164	28,18	—	2000 ± 200 ; 1,3 мин	—
	165	139 мин	—	800 ± 100 ; 140 мин $5000 \pm 2000^*$; 82 ч	—
^{67}Ho	165		65 ± 3	60 ± 12 ; 27,3 ч	—
^{68}Er		Естеств.	173 ± 17	—	15 ± 4
	162	0,136	—	$2,03 \pm 0,20$; 75 мин	—
	164	1,56	—	$1,65 \pm 0,17$; 10 ч	—
	168	27,1	—	$2,0 \pm 0,4$; 9,4 дня	—
	170	14,9	—	9 ± 2 ; 2,5 сек + 7,5 ч	—
^{69}Tm	169	100	127 ± 4	130 ± 30 ; 129 дней	7 ± 3
	170	129 дней	—	$150 \pm 20^*$; 1,9 года	—
^{70}Yb		Естеств.	37 ± 4	—	12 ± 5
	168	0,140	—	$11000 \pm 3000^*$; 32 дня	—
	174	31,84	—	60 ± 40 ; 101 день	—
	176	12,73	—	$5,5 \pm 1$ 0; 1,8 ч	—
^{71}Lu		Естеств.	112 ± 5	—	—
	175	97,40	—	35 ± 15 ; 3,7 ч	—
	176	2,60	—	4000 ± 800 ; 6,8 дня	—
^{72}Hf		Естеств.	102 ± 3	—	8 ± 2
	174	0,18	1500 ± 1000	390 ± 55	—
	176	5,15	15 ± 15	—	—
	177	18,39	380 ± 30	—	—
	178	27,08	75 ± 10	—	—
	179	13,78	65 ± 15	—	—
	180	35,44	14 ± 5	10 ± 3 ; 46 дней	—
	181		—	40^*	—
^{73}Ta	181	100	210 ± 1	$(30 \pm 10) 10^{-3}$; 16,4 мин	5 ± 1
	182	111 дней	—	19 ± 7 ; 111 дней $(1,7 \pm 0,2) \cdot 10^4$; 5,5 дня	—
^{74}W		Естеств.	$19,2 \pm 1,0$	—	5 ± 1
	180	0,14	60 ± 60	10 ± 10 ; 140 дней	—
	182	26,4	20 ± 2	—	—
	183	14,4	11 ± 1	—	—

Элемент	Массовое число	Содержание, %; период полураспада	σ_{γ} , барн	$\sigma_{\text{акт}}$, барн; период полураспада образующегося β -излучателя	$\sigma_{\text{рас}}$, барн
^{74}W	184	30,6	$2,4 \pm 0,22$	$2,1 \pm 0,6$; 73 дня	—
	186	28,4	35 ± 3	34 ± 7 ; 24 ч	—
	187	24 ч	—	90 ± 40 ; 65 дней	—
^{76}Re	185	Естеств. 37,07	86 ± 4	—	14 ± 4
	187	62,93	104 ± 8	120 ± 12 ; 92 ч	—
	188	17 ч	66 ± 5	69 ± 7 ; 17 ч	—
^{76}Os		Естеств.	$15,3 \pm 0,7$	—	11 ± 1
	184	0,018	—	< 200 ; 97 дней	—
	190	26,4	—	8 ± 3 ; 16,8 дня	—
	192	41,0	—	$1,6 \pm 0,4$; 31 ч	—
^{77}Ir	193	31 ч	—	600 ± 200 ; 700 дней	—
	191	Естеств. 38,5	440 ± 20	—	—
	192	74 дня	—	260 ± 100 ; 1,4 мин	—
	193	61,5	—	700 ± 200 ; 74 дня	—
^{78}Pt		Естеств.	$8,8 \pm 0,4$	—	10 ± 1
	190	0,012	150 ± 150	$0,76 \pm 0,10$; 18ч	—
	192	0,78	8 ± 8	90 ± 40 ; 4,3 дня	—
	194	32,8	$1,2 \pm 0,9$	—	—
	195	33,7	27 ± 2	—	—
	196	25,4	$0,7 \pm 0,7$	$0,87 \pm 0,09$; 18 ч	—
	198	7,2	$4,0 \pm 0,5$	$3,9 \pm 0,8$; 31 мин	—
	199	31 мин	—	15 ± 10 ; 11,5 ч	—
^{79}Au	197	100	$98,8 \pm 0,3$	96 ± 10 ; 2,7 дня	$9,3 \pm 1,0$
	198	2,7 дня	—	26000 ± 1200 ; 3,15 дня	—
	199	3,15 дня	—	$30 \pm 15^*$; 48 мин	—
^{80}Hg	196	Естеств. 0,146	374 ± 5 $f = 0,95$ $3100 \pm 1000^*$	—	20 ± 5
	198	10,02	—	420 ± 80 ; 24 ч	—
	199	16,84	—	880 ± 175 ; 65 ч	—
	200	23,13	$2500 \pm 800^*$	$0,018 \pm 0,004$; 46,6 ч	—
	201	13,22	$< 60^*$	—	—
	202	29,80	$< 60^*$	—	—
	204	6,85	$< 60^*$	$3,8 \pm 0,8$; 47 дней	—
				$0,43 \pm 0,10$; 5,5 мин	—
^{81}Te	203	Естеств. 29,50	$3,4 \pm 0,5$ $11,4 \pm 0,9$	—	14 ± 2
	205	70,50	$0,80 \pm 0,08$	8 ± 3 ; 2,7 года	—
				$0,10 \pm 0,03$; 4,2 мин	—
^{82}Pl	204	Естеств. 1,48	$(170 \pm 10) 10^{-3}$ $0,8 \pm 0,6$	—	11 ± 1
	206	23,6	$(25 \pm 5) 10^{-3}$	$0,7 \pm 0,2^*$; $5 \cdot 10^7$ лет	—
	207	22,6	$0,70 \pm 0,03$	—	—
	208	52,3	$< 30 \cdot 10^{-3}$	$(0,6 \pm 0,2) 10^{-3}$; 3,2 ч	—
^{83}Bi	209	100	$(34 \pm 2) 10^{-3}$	$(19 \pm 2) 10^{-3}$; 5 дней	9 ± 1
^{86}Rn	220	54 сек	—	$< 0,2^*$; 25 мин	—
	222	3,83 дня	—	$0,72 \pm 0,07^*$; 11,7 дня ^{223}Ra	—

Элемент	Массовое число	Содержание, %; период полураспада	σ (n , a), барн	$\sigma_{\text{акт}}$, барн	$\sigma_{\text{рас}}$, барн
^{88}Ra	223	11,2 дня	—	$130 \pm 20^*$; 3,64 дня	—
	224	3,64 дня	—	$12 \pm 0,5^*$; 14,8 дня	—
	226	1620 лет	—	$20 \pm 3^*$; 41,2 мин	—
	228	6,7 года	—	$36 \pm 5^*$; < 10 мин	—
^{89}Ac	227	22 года	510 ± 40	795 ± 20 ; 6,13 ч	—
^{90}Th	227	18,6 дня	—	—	—
	228	1,9 года	—	$123 \pm 15^*$; $7,3 \cdot 10^3$ лет	—
	230	$7,5 \cdot 10^4$ лет	$22,7 \pm 0,6$	$21,4 \pm 0,3$; 25,5 ч	—
	232	100%; $1,45 \cdot 10^{10}$ лет	$7,56 \pm 0,11$	$7,33 \pm 0,12$; 23,3 мин	$12,5 \pm 0,3$
	233	23,3 мин	—	1450; 24,1 дня	—
^{91}Pa	234	24,1 дня	—	$1,8 \pm 0,5^*$; ≤ 10 мин	—
	231	$3,248 \cdot 10^4$ лет	200 ± 20	200 ± 15 ; 1,31 дня	—
	232	1,31 дня	—	$760 \pm 100^*$; 27,4 года	—
	233	27,4 дня	—	20 ± 4 ; 1,18 мин	—
^{92}U	233	27,4 дня	—	19 ± 3 ; 6,7 ч	—
	232	Естеств. 73 года	$7,68 \pm 0,07$	—	$8,3 \pm 0,2$
	233	$1,61 \cdot 10^5$ лет	—	$300 \pm 200^*$; $1,62 \cdot 10^6$ лет	—
	234	$0,0057\%$; $2,52 \cdot 10^8$ лет	578 ± 4	49 ± 2 ; $2,52 \cdot 10^5$ лет	$12,4 \pm 1,4$
	235	$0,714\%$; $7,1 \cdot 10^8$ лет	97 ± 5	105 ± 4 ; $7,1 \cdot 10^8$ лет	—
	236	$2,4 \cdot 10^7$ лет	683 ± 3	107 ± 5 ; $2,4 \cdot 10^7$ лет	$15,2 \pm 2,3$
	238	$99,3\%$; $4,5 \cdot 10^9$ лет	$5,5 \pm 0,3$	$6 \pm 1,0$; 6,7 дня	—
	239	23,5 мин	$2,71 \pm 0,02$	$2,74 \pm 0,06$; 23,5 мин	—
^{93}Np	237	2,2 $\cdot 10^8$ лет	170 ± 5	22 ± 5 ; 17 ч	$8,4 \pm 1,2$
	239	2,3 дня	—	169 ± 6 ; 2,1 дня	—
				$31 \pm 6^*$; 7,0 мин	—
^{94}Pu	238	89,6 года	403 ± 10	$18 \pm 18^*$; 60 мин	—
	239	$2,44 \cdot 10^4$ лет	1028 ± 13	—	—
	240	$6,6 \cdot 10^3$ лет	287 ± 7	403 ± 10 ; $2,44 \cdot 10^3$ лет	—
	241	13,2 года	1400 ± 80	315 ± 16 ; $6,6 \cdot 10^3$ лет	$12,1 \pm 1,7$
	242	$3,7 \cdot 10^5$ лет	$18,6 \pm 0,8$	250 ± 40 ; 13,2 года	—
	243	4,98 ч	—	390 ± 50 ; $3,7 \cdot 10^5$ лет	—
	244	$7,5 \cdot 10^7$ лет	—	19 ± 1 ; 4,98 ч	—
	245	10,6 ч	—	$170 \pm 90^*$; $7,5 \cdot 10^7$ лет	—
^{95}Am	241	461 год	630 ± 35	$1,8 \pm 0,3^*$; 10 ч	—
	242	100 лет	$8000 \pm 1000^*$	265 ± 145 ; 11,2 дня	—
	243	$7,6 \cdot 10^3$ лет	115*	—	—
^{96}Cm	242	16,5 дня	—	$750 \pm 80^*$; 16 ч	—
	243	35 лет	$500 \pm 300^*$	$50 \pm 40^*$; 100 лет	—
	244	18 лет	—	—	—
	245	$2 \cdot 10^4$ лет	—	$15 \pm 10^*$; $2 \cdot 10^4$ лет	—
	246	$6,6 \cdot 10^3$ лет	—	$200 \pm 100^*$; $6,6 \cdot 10^3$ лет	—
	248	$4,2 \cdot 10^5$ лет	—	$15 \pm 10^*$; $> 10^6$ лет	—
^{97}Bk	249	290 дней	—	6 ± 4 ; 65 мин	—
	249	470 лет	$900 \pm 400^*$	500 ± 200 ; 3,1 ч	—
	250	10 лет	—	—	—
	251	700 лет	—	$270 \pm 100^*$; 10 лет	—
	252	2,2 года	—	$1500 \pm 1000^*$; 700 лет	—
^{98}Cf	254	55 дней	—	$3000 \pm 2000^*$; 2,2 года	—
				28 ± 7 ; 18 дней	—
				$< 2^*$	—
^{99}Es	253	20 дней	—	$300 \pm 150^*$; 38 ч	—
	254	480 дней	$2700 \pm 600^*$	$< 40^*$; 24 дня	—

41.2. ГРАФИКИ ПОЛНЫХ НЕЙТРОННЫХ СЕЧЕНИЙ В ИНТЕРВАЛЕ ЭНЕРГИЙ 0,01—10⁷ эв

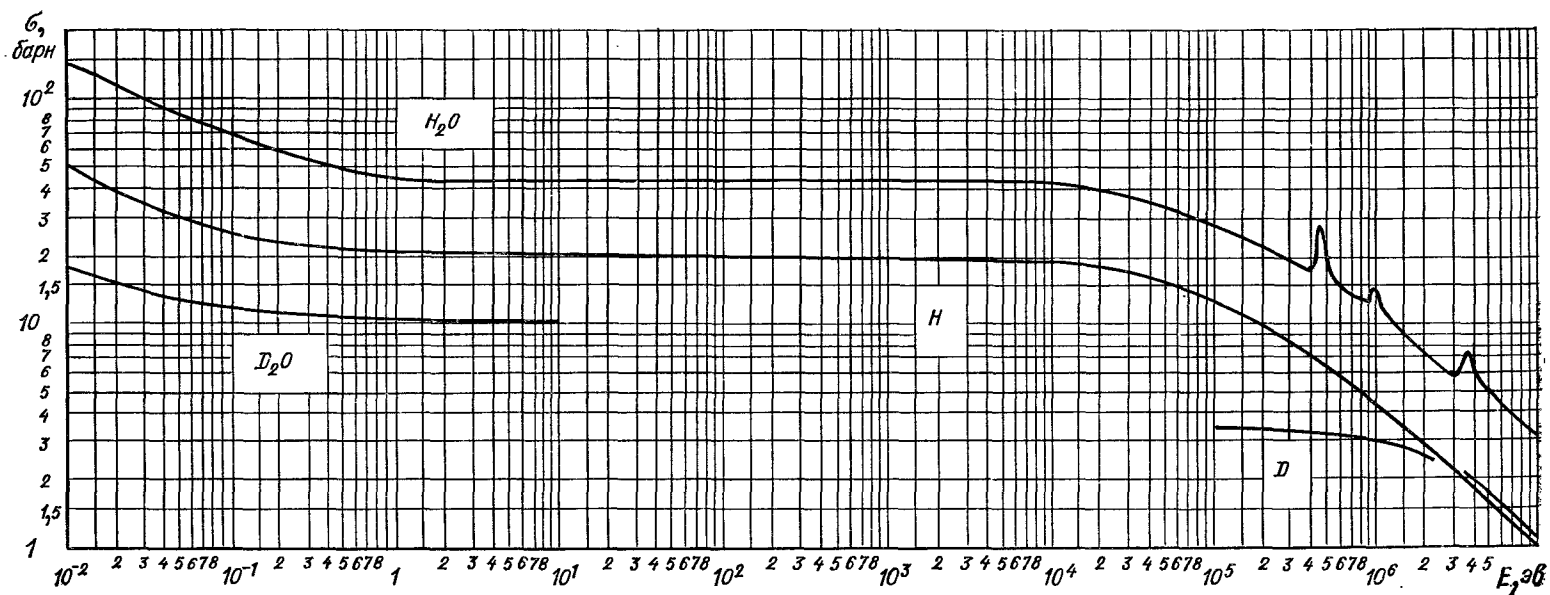


Рис. 41.1. Зависимость полных нейтронных сечений σ от энергии E для ^1H [3], ^2D [2], H_2O [1, 2] и D_2O [2].

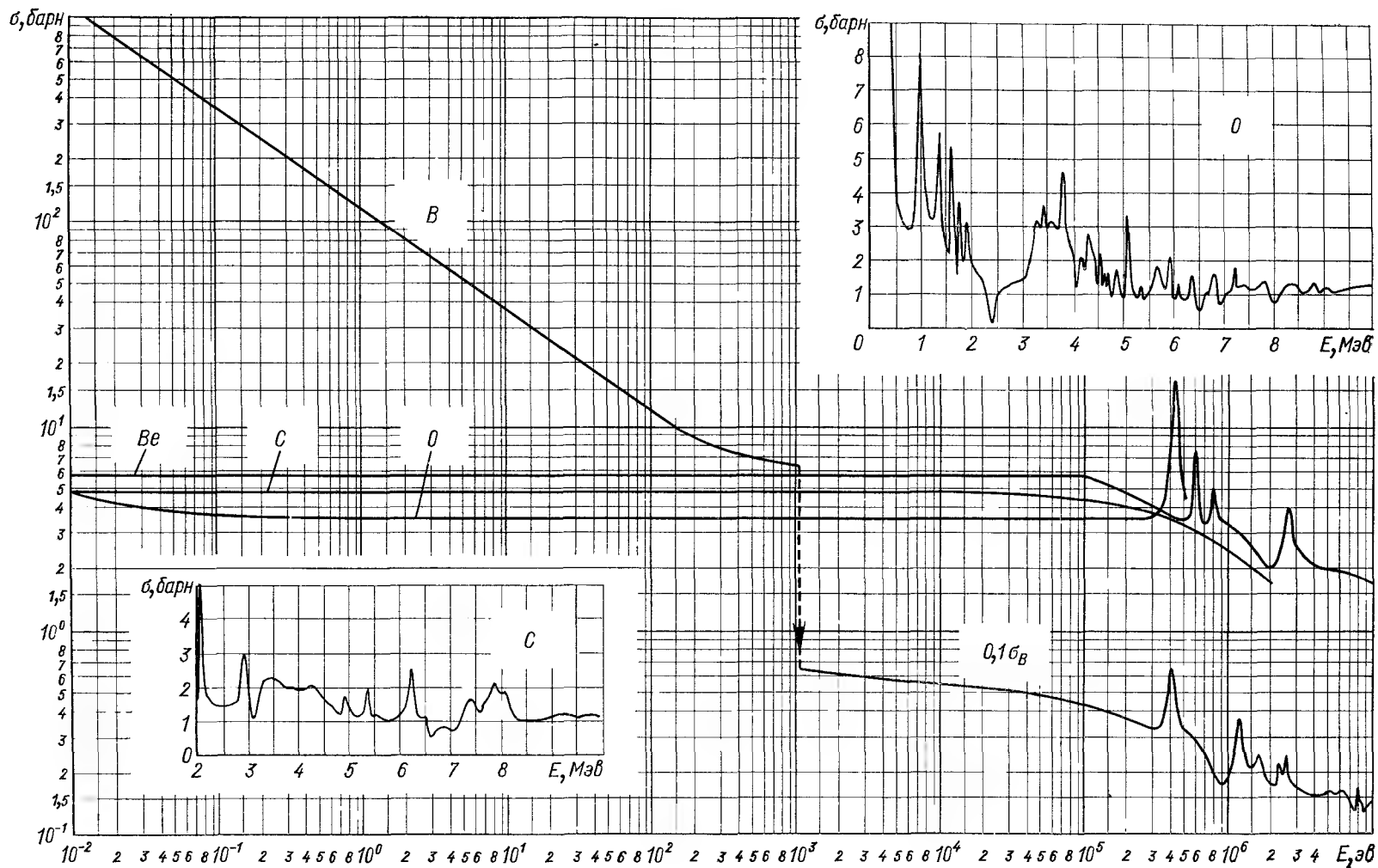


Рис. 41.2. Зависимость полных нейтронных сечений σ от энергии E для Be и B [2], C и O [3].

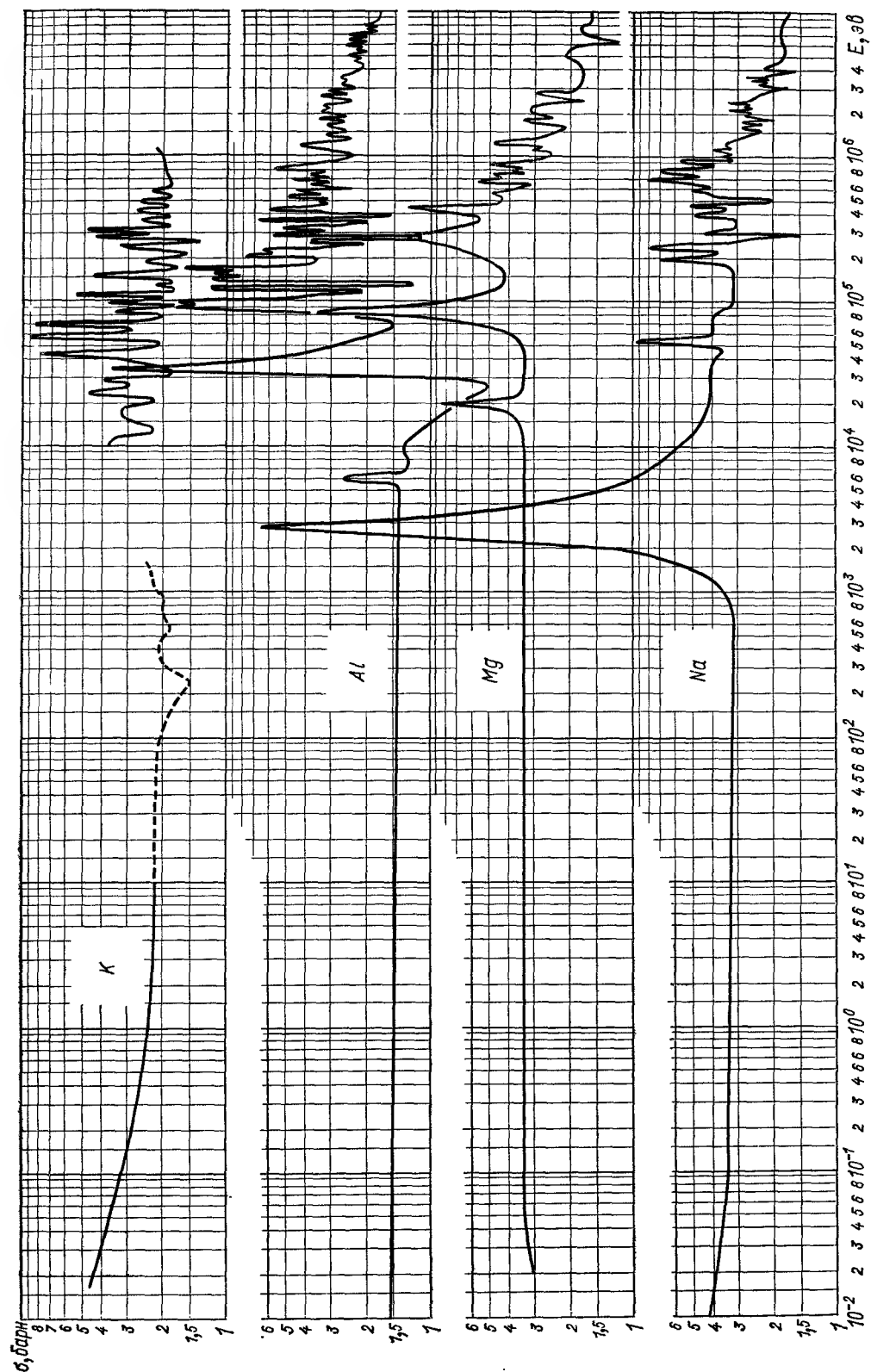


Рис. 41.3. Зависимость полных нейтронных сечений σ от энергии E для Na, Mg, Al и K [2]. Штриховая линия — сечение $\sigma_{\text{рас}}$ для K [1].

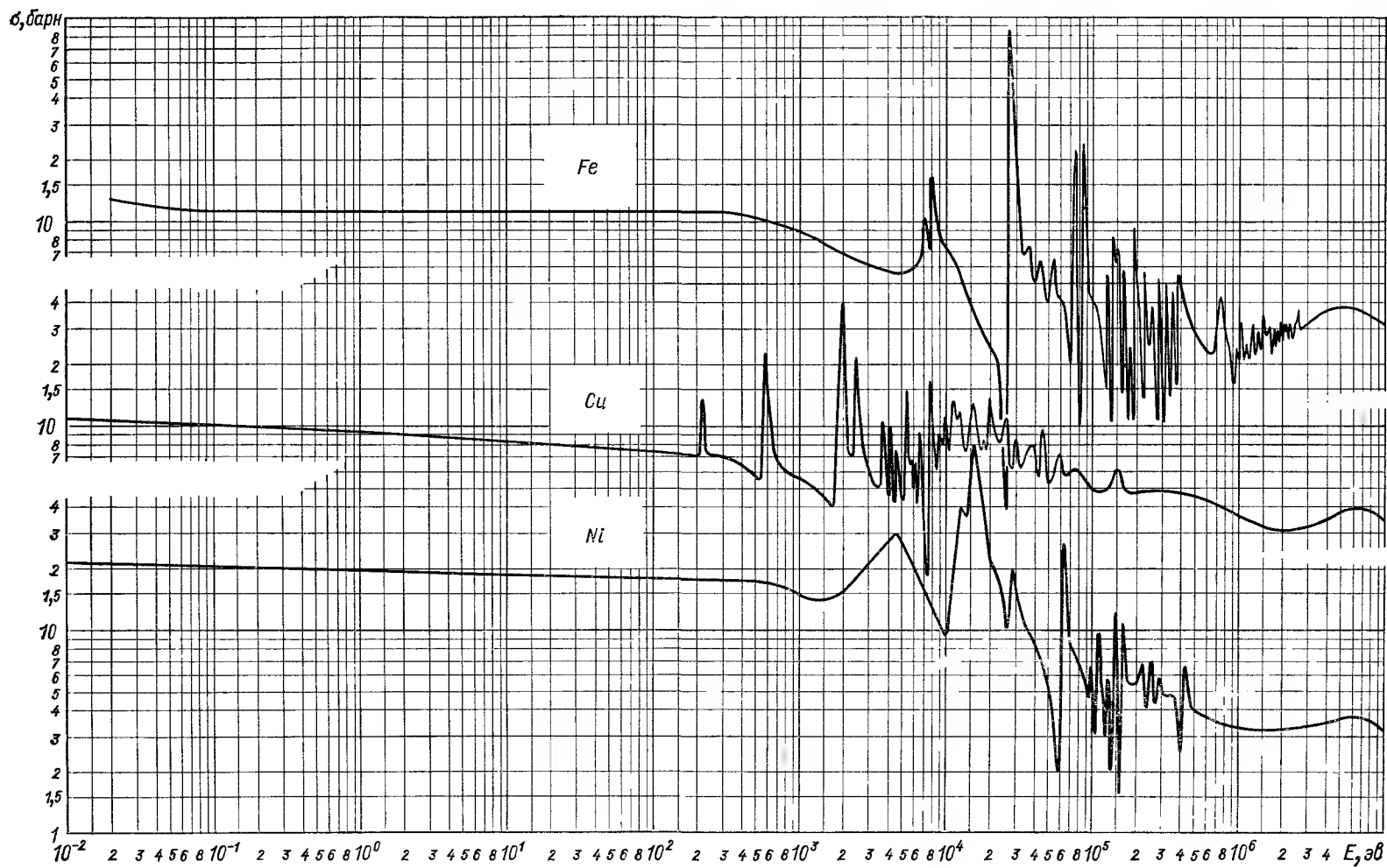
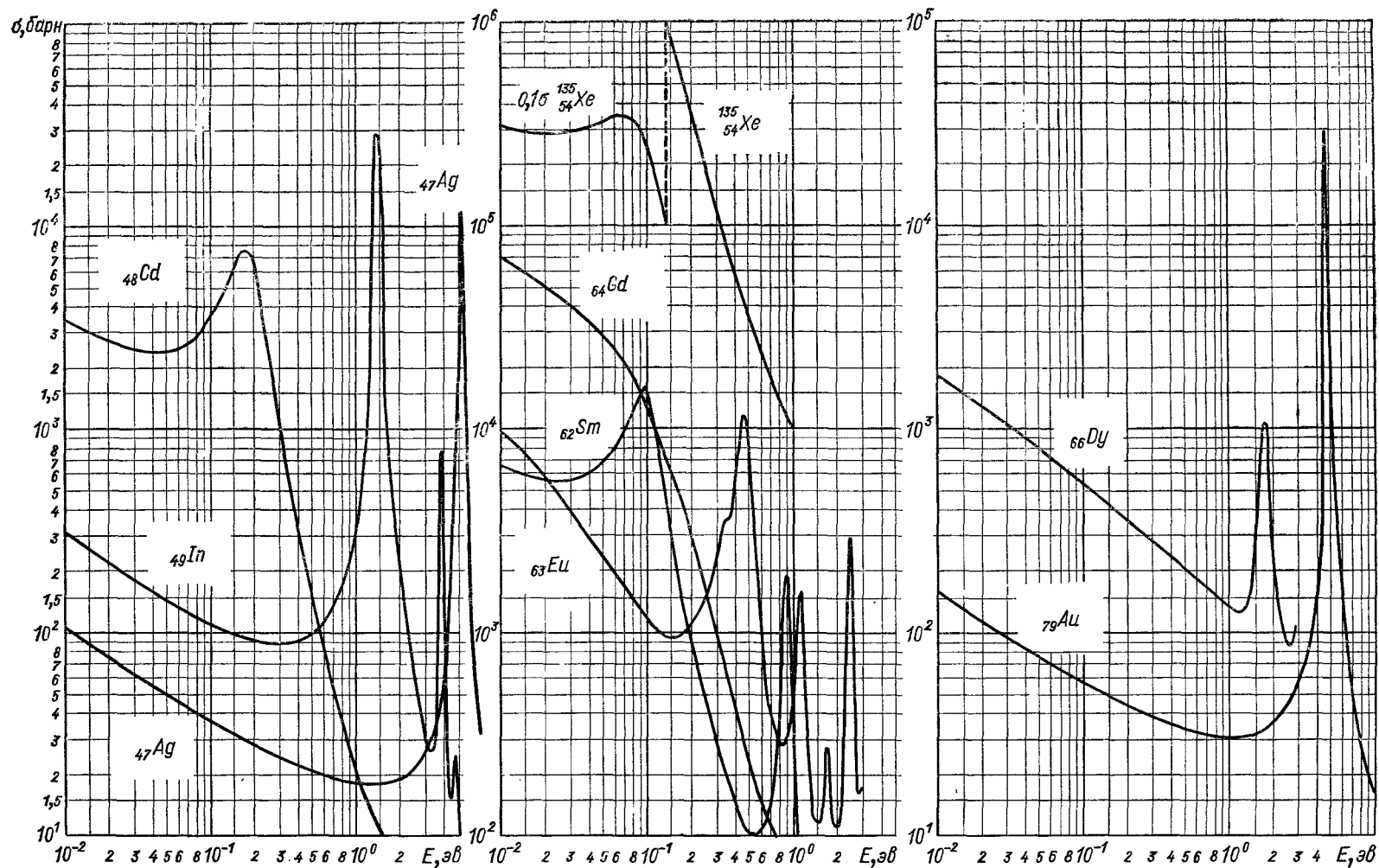


Рис. 41.4. Зависимость полных нейтронных сечений σ от энергии E для Fe, Ni и Cu [2].



41.5. Зависимость полных нейтронных сечений σ от энергии E для Ag, Cd, In, Xe, Sm, Eu, Gd, Dy и Au [2].

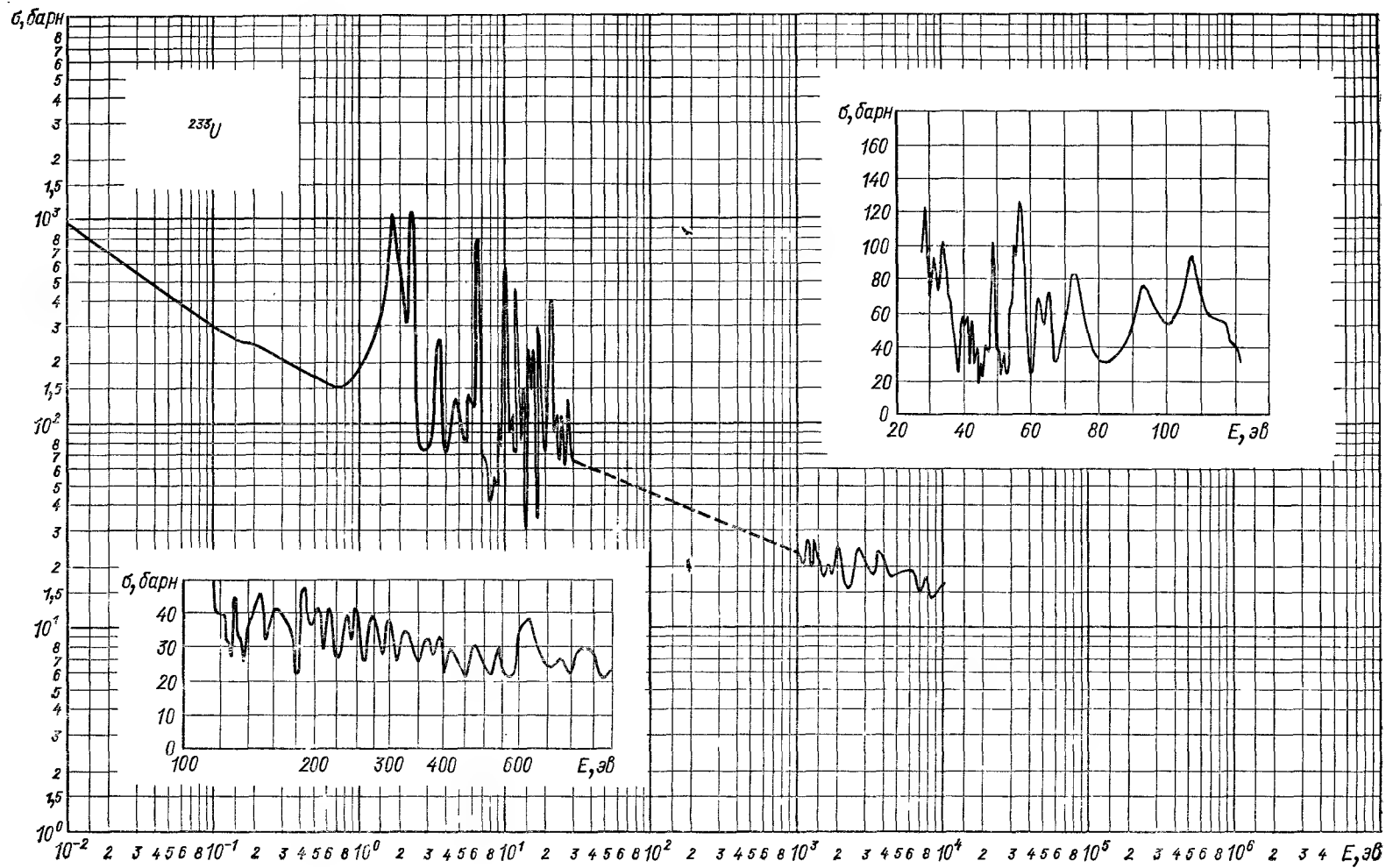


Рис. 41.3. Зависимость полного нейтронного сечения σ от энергии E для ^{233}U [2].

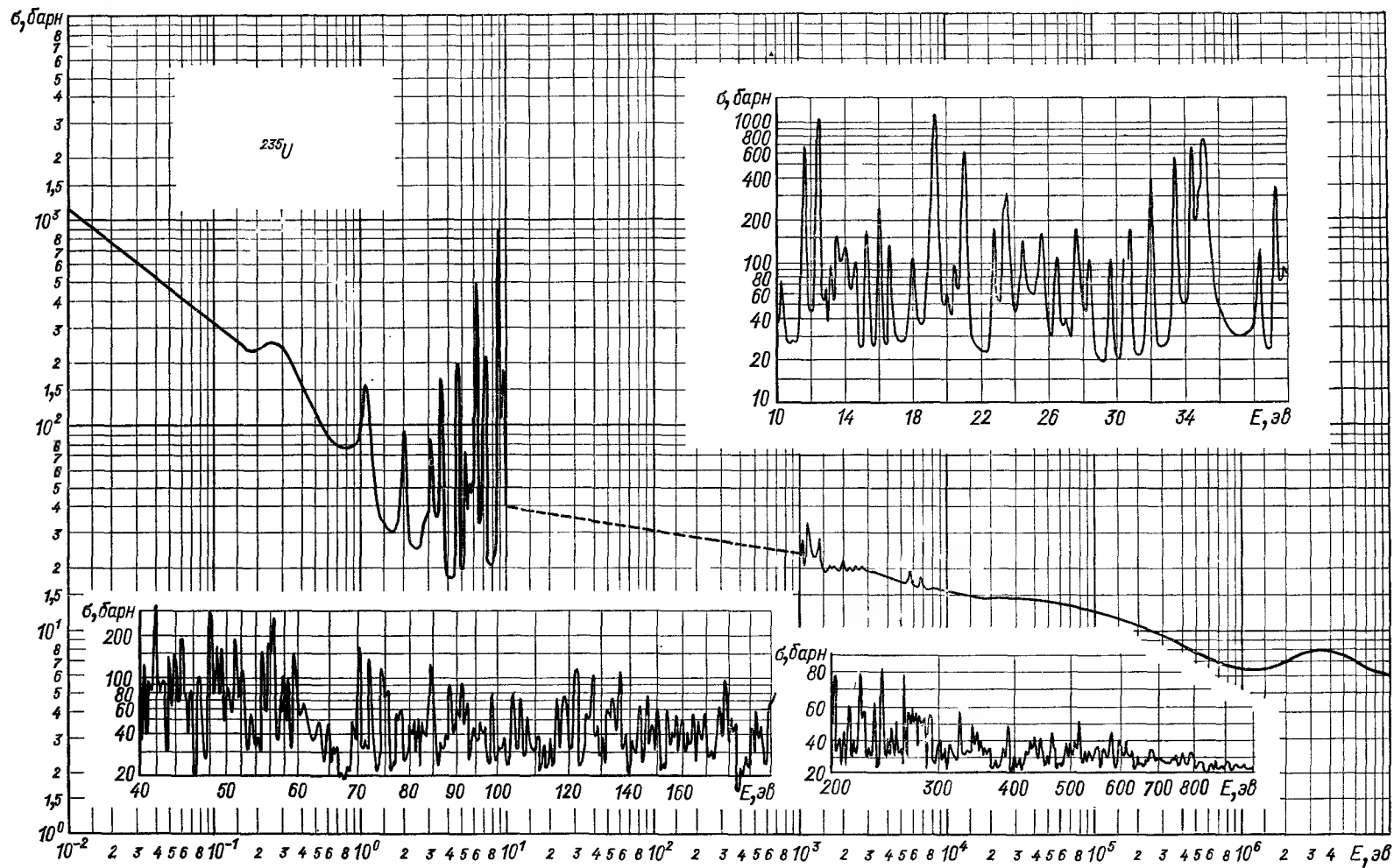


Рис. 41.7. Зависимость полного нейтроного сечения σ от энергии E для ^{235}U [3].

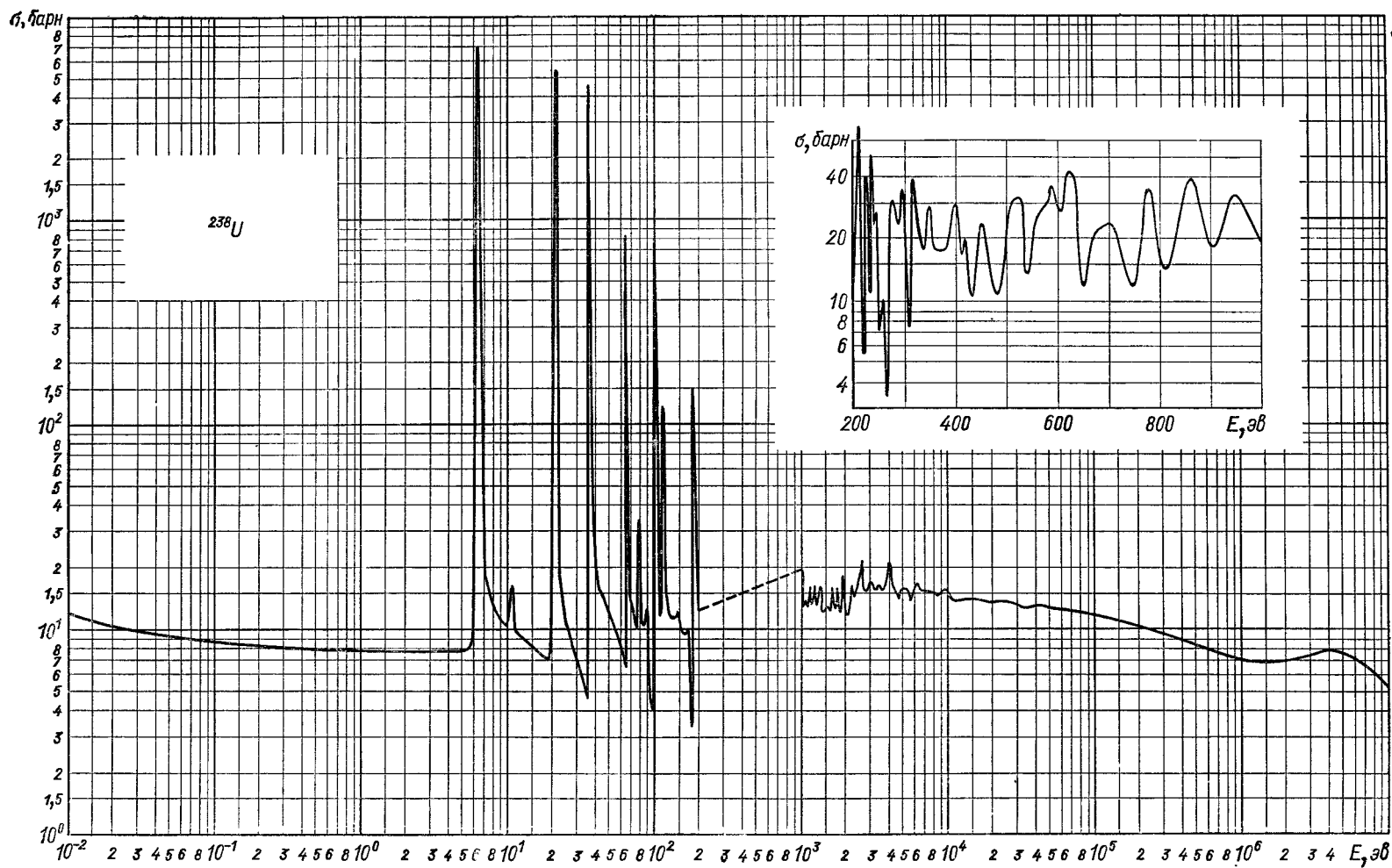


Рис. 41.8. Зависимость полного нейтронного сечения σ от энергии E для ^{238}U : 0,01—1 эВ [3], 1—1000 эВ [2] и 10^3 — 10^6 эВ [3].

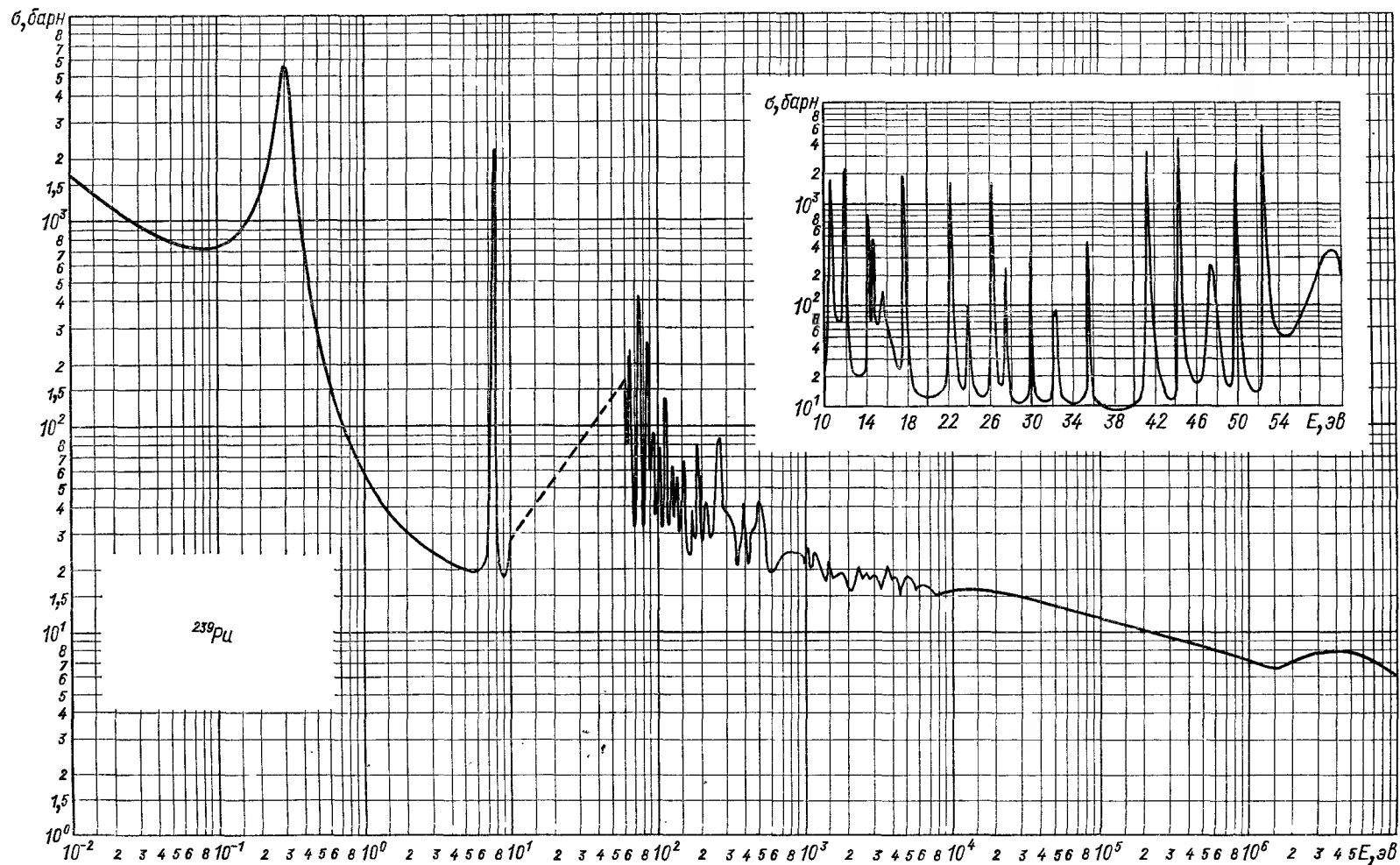


Рис. 41.9. Зависимость полного нейтронного сечения σ от энергии E для ^{239}Pu [3].

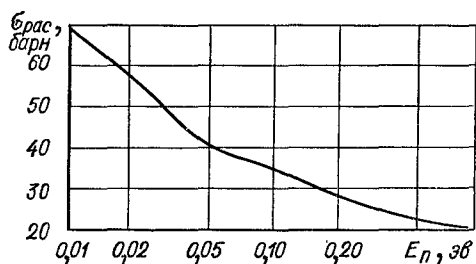


Рис. 41.10. Зависимость сечения рассеяния $\sigma_{\text{рас}}$ от энергии нейтронов E_n в H_2O [14].

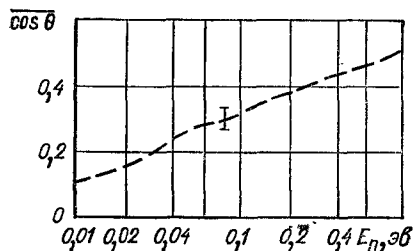


Рис. 41.11. Зависимость среднего косинуса угла рассеяния нейтронов в H_2O от их энергии E_n [14]. Погрешность на кривой дает представление о разбросе экспериментальных данных.

41.3. РЕЗОНАНСНЫЕ ИНТЕГРАЛЫ ЗАХВАТА

Резонансный захват нейтронов. В том случае, если сумма энергии падающего нейтрона и энергии связи его в образующемся промежуточном ядре равна энергии одного из квазистационарных уровней этого ядра, вероятность резонансного захвата нейтрона сильно возрастает. Время жизни квазистационарного уровня τ связано с энергетической шириной Γ соотношением $\tau = \hbar/\Gamma$; $\hbar = \hbar/(2\pi)$, $\hbar$ — постоянная Планка. Вблизи резонансного уровня сечение реакции описывается формулой Брейта — Вигнера. Если скорость нейтронов не велика, то в реакцию вступают главным образом нейтроны с орбитальным квантовым числом $l = 0$. В этом случае формула Брейта — Вигнера для отдельного изолированного резонанса имеет вид

$$\sigma(n, x) = \pi \bar{\lambda}^2 \frac{2J + 1}{2(2I + 1)} \cdot \frac{\Gamma_n \Gamma_x}{(E - E_0)^2 + \Gamma^2/4}.$$

Здесь $\bar{\lambda} = \lambda/(2\pi)$; λ — длина волны нейтрона; I — спин ядра-мишени; J — спин промежуточного ядра ($J = I \pm 1/2$); Γ_n — нейтронная ширина уровня; Γ_x — ширина для испускания частицы x , $\Gamma = \sum_i \Gamma_i$; E_0 — энергия резонансного

уровня. Вероятность эмиссии частицы x : $W_x = \Gamma_x/\Gamma$. В качестве процесса x могут выступать процессы эмиссии нейтрона, γ -кванта, α -частицы, протона и т. п.

Резонансный интеграл захвата. Резонансным интегралом захвата называется величина

$$I = \int_{E_{\text{Cd}}} \sigma(E) \frac{dE}{E},$$

Резонансные интегралы захвата [1]

Если в соответствии с экспериментом нижняя граница резонансного интеграла была не 0,4 эв, то в скобках указана нижняя граница, например (0,15).

Нуклид	I, барн. Измерено		Вклад $I(1/v)$, барн
	по активации	по поглощению	
Li	—	28	31
B	—	280 ± 40	342
N	—	4,8 ± 2,4	0,83
¹⁹ F	0,30 ± 0,02	2,3 ± 0,5 [14]	0,23
²³ Na	~0,24	0,27	—
Mg	—	0,077 ± 0,022	0,03
²⁷ Al	~0,16	0,18	0,11
Si	—	0,5	0,07
P	~0,092	2	0,09
S	—	0,6	0,23
Cl	—	12,8 ± 1,7	14,8
K	—	3,5 ± 1,1 [14]	0,91
Ca	—	2	0,19
⁴⁵ Sc	~10,7	—	10,5
Ti	—	3,0	2,6
⁵¹ V	~2,2	3,3 ± 0,8	2,2
Cr	—	2,6 ± 1,1 [14]	1,4
⁵⁵ Mn	14,0 ± 0,6	14,0 ± 0,3	5,83
Fe	—	1,9 ± 0,4	1,15
⁵⁸ Co	75 ± 5	≤ 87	17,1
Ni	—	≤ 3,1	2,0
Cu	4,26 ± 0,15	3,7 ± 0,8	1,7
⁶³ Cu	5,04 ± 0,15	—	1,95
⁶⁵ Cu	2,30 ± 0,23	—	0,92
Zn	—	1,66 ± 0,16	0,48
Ga	—	11,7 ± 2,7	1,23
⁶⁹ Ga	9,1	—	0,62
⁷¹ Ga	15	—	1,76
Ge	—	3,5 ± 2,9	1,1
⁷⁵ As	36,8	33	1,9
Se	—	9,6 ± 1,2	5,4
Br	—	118 ± 14	2,9
⁷⁹ Br	147	—	4,6
Rb	9,0 ± 2,8	—	0,32
Sr	—	10,0 ± 2,6	0,53
⁸⁹ Y	0,91	—	0,56
Zr	—	0,93 ± 0,15	0,08
⁹³ Nb	3,86	13,5 ± 5,0	0,51
Mo	—	20,2 ± 2,5	1,2
⁹⁵ Mo	—	106 ± 20	6,1
⁹⁸ Mo	10,8 ± 2,5	—	0,08
¹⁰⁰ Mo	3,73 ± 0,20	—	0,09
⁹⁹ Tc	—	67 ± 20	7,0
¹⁰³ Rh	656	575	69
Pd	—	23	3,5
Ag	—	838 ± 50	28
¹⁰⁷ Ag	74	—	15
¹⁰⁹ Ag	1160	1910 ± 200	40
In	—	3686 ± 350	86
¹¹³ In	1050	—	26
¹¹⁵ In	2639 ± 133	—	~91
Sn	—	5,7 ± 0,7	0,27
Sb	—	115 ± 12	2,5
¹²¹ Sb	162	—	2,6
¹²³ Sb	~138	—	1,1
Te	—	~74	2,1
¹²⁷ I	140	183 ± 30	3,1

Нуклид	I, барн. Измерено		Вклад I(1/v), барн
	по активации	по поглощению	
¹²⁹ I	55 ± 22	—	4,8
¹³⁸ Cs	370 ± 50	503 ± 80	13
¹³⁵ Cs	96 ± 3	—	3,8
Ba	—	7,5	0,53
La	—	11	4,1
Ce	—	3,7 ± 1,7	0,32
¹⁴¹ Pr	11,3	7 ± 3	5,1
¹⁴³ Pr	—	190 ± 25	39
Nd	—	40 ± 6	20
¹⁴³ Nd	—	190	140
¹⁴⁵ Nd	—	146 ± 15	26
¹⁴⁷ Pm	1700 ± 170	—	55
¹⁴⁷ Sm	—	< 1390	38
¹⁴⁹ Sm	—	4400	—
¹⁵² Sm	—	3100 ± 200	98
¹⁵¹ Eu	901 ± 138	< 3000	—
¹⁵⁸ Eu	950	1420 ± 100	140
Gd	—	67 ± 8,0	—
¹⁶⁰ Dy	482 ± 33	—	—
Lu	—	720 ± 70	50
¹⁷⁵ Lu	463 ± 15	—	5,8
¹⁷⁶ Lu	887 ± 65	—	—
Hf	1750	2900 ± 350	46
¹⁸⁰ Hf	21,8	—	5,5
¹⁸¹ Ta	590	1110 ± 400	9,2
W	—	338 ± 60	8,5
¹⁸⁶ W	355	396 ± 59	15,0
¹⁸⁵ Re	1160	—	46
¹⁸⁷ Re	305	—	30
O ³	—	180 ± 20	6,7
Ir	—	2000 ± 490	193
¹⁹¹ Ir	3500	—	420
¹⁹³ Ir	1370	—	57
Pt	—	190	4,2
¹⁹⁷ Au	1558	—	45
Hg	—	73 ± 5	—
²⁰³ Tl	129	—	4,8
²⁰⁵ Tl	0,5	—	0,04
Pb	—	0,125 ± 0,030	0,075
²⁰⁹ Bi	0,085 ± 0,008	—	0,008
²³² Th	85	85 ± 10	3,2
²³² Th	500 ± 150	400 ± 100	—
²³⁸ Pa	470 ± 70	1200 ± 400	8,8
U	—	224 ± 40	3,4
²³⁸ U	—	300 ± 100	—
²³⁴ U	—	700 ± 100	42
²³⁵ U	271 ± 25 (γ)	150 ± 50	—
²³⁸ U	350 ± 40	400 ± 100	2,6
²³⁸ U	280 ± 15	286 ± 25	1,2
²³⁷ Np	—	945 ± 130	75
²³⁸ Pu	—	3260 ± 280	180
²³⁹ Pu	—	327 ± 22 (γ)	—
	—	1500 ± 300 (0,15)	—
²⁴⁰ Pu	—	9000 ± 1500	130
²⁴¹ Pu	—	1000 ± 300 (0,15)	—
²⁴² Pu	—	1300 ± 200	13
²⁴³ Am	—	2290 ± 50	—

где $E_{Cd} = 0,4 \text{ эв}$ — эффективная граница кадмиевого среза. Обычно предполагается, что с достаточной степенью точности полный резонансный интеграл имеет вид

$$I = \sum_i I_i^{\text{рез}} + I(1/v),$$

где суммирование производится по всем резонансам, а $I(1/v) = (1/2)\sigma$ (2200 м/сек) учитывает суммарный вклад сечения, подчиняющегося закону $1/v$.

В качестве эталона при измерениях резонансных интегралов обычно используется ¹⁹⁷Au, для которого при толщине образца 0,015 мг/см² и толщине кадмиевого фильтра 0,44 г/см² принимаются значения $I = (1558 \pm \pm 62) \text{ барн}$ и $I(1/v) = 45 \text{ барн}$.

41.4. ДИФфуЗИОННЫЕ ПОСТОЯННЫЕ ВЕЩЕСТВ

Замедление нейтронов

Если нейтроны с высокими скоростями ввести в среду с малым сечением поглощения нейтронов, то они начнут терять свою энергию в результате столкновений с ядрами. При соответствующих условиях процесс замедления продолжается до тех пор, пока нейтроны не приобретут скорости, отвечающие их тепловому равновесию с ядрами среды.

При энергиях нейтронов $< 0,1 \text{ Мэв}$ наиболее существенным процессом является упругое рассеяние нейтронов с нулевым орбитальным квантовым числом $l = 0$. В этом случае рассеяние изотропно в системе центра масс.

В элементарной теории замедления предполагается, что замедление нейтронов обусловлено исключительно упругими соударениями, и ядра, с которыми сталкиваются нейтроны в процессе замедления, до столкновения находились в покое. Эти предположения удовлетворительно выполняются в диапазоне энергий нейтронов от 0,1 эв до 0,1 Мэв. После соударения с ядром среды нейтрон в лабораторной системе координат отклоняется на угол ψ , определяемый из соотношения

$$\cos \psi = \frac{A \cos \theta + 1}{\sqrt{A^2 + 2A \cos \theta + 1}},$$

где A — масса ядра-мишени и θ — угол рассеяния в системе координат, связанной с центром масс. Среднее значение $\cos \psi = 2/(3A)$. Энергия рассеянного нейтрона

$$E_K = \frac{A^2 + 2A \cos \theta + 1}{(A + 1)^2} E_H,$$

где E_H — энергия нейтрона до столкновения; E_K — энергия нейтрона после столкновения. Максимальная потеря энергии

$$\max (E_H - E_K) = E_H (1 - \alpha) \quad \text{при} \quad \alpha \equiv \left(\frac{A - 1}{A + 1} \right)^2.$$

Средняя логарифмическая потеря энергии на одно столкновение

$$\xi = \overline{(\ln E_H - \ln E_K)} = \ln \frac{E_H}{E_K} = 1 + \frac{(A - 1)^2}{2A} \ln \frac{A - 1}{A + 1}.$$

Среднее число столкновений при замедлении от энергии E_H до энергии E_K :

$$N = \frac{1}{\xi} \ln \frac{E_H}{E_K}.$$

Таблица 41.3

Свойства некоторых замедлителей [4,5]

n — среднее число столкновений при замедлении от 2 Мэв до тепловой энергии.

Замедлитель	$1-\alpha$	ξ	$\overline{\cos \psi}$	n
^1H	1,00	1,00	0,67	18
^2D	0,889	0,725	0,33	25
^4He	0,640	0,425	0,167	43
^7Li	0,438	0,268	0,095	67
^9Be	0,360	0,209	0,074	86
^{12}C	0,284	0,158	0,056	114
^{16}O	0,222	0,120	0,042	150
Ядра с большим A	$4/(A+2)$	$2/(A+2/3)$	$2/(3A)$	$9A+6$
H_2O	—	0,948	0,323	—
D_2O	—	0,570	0,116	—
BeO	—	0,173	0,061	—

Время замедления нейтронов. Время t , в течение которого нейтрон с начальной энергией E_n замедляется до E_k , называют временем замедления, или хронологическим возрастом нейтронов

$$t = \frac{2}{\xi} \bar{\lambda}_{\text{рас}} \left(\frac{1}{v_k} - \frac{1}{v_n} \right),$$

где $\bar{\lambda}_{\text{рас}}$ — длина свободного пробега нейтрона по отношению к рассеянию; v — скорость нейтрона.

Возраст нейтронов для некоторых замедлителей

В скобках в первой колонке указана энергия моноэнергетических нейтронов в мегаэлектронвольтах. Для смесей указано объемное отношение компонент, например 50% H_2O , 50% Zr . E_k — значение граничной энергии, до которой производилось измерение возраста.

Источник нейтронов	Замедлитель (плотность, г/см ³)	Детектор (E_k , эв)	Возраст τ , см ²	Литература
Sb- γ -Be (0,025)	H_2O	In	$5,48 \pm 0,15$	[14]
Na- γ -Be (0,970)	H_2O	In	$13,9 \pm 0,2$	[14]
Спектр деления	H_2O	In	$27,86 \pm 0,1$	[14]
Реакция D (d, n) (2,6)	H_2O	In	$34,6 \pm 2,2$	[14]
Ra- α -Be	H_2O	In	48,5	[7]
Po- α -Be	H_2O	In	$57,3 \pm 2,0$	[14]
Реакция T (d, n) (14,1)	H_2O	In	150 ± 6	[14]
Спектр деления	H_2O	(0,025)	$30,2 \pm 1,5$	[1]
Ra- α -Be	H_2O	Dy	55	[7]
Po- α -Be	H_2O	(0,025)	62 ± 5	[9]
Спектр деления	50% H_2O ; 50% Al	In	76,8	[7]
» »	50% H_2O ; 50% Zr	(0,025)	81,7	[7]
Ra- α -Be	50% H_2O ; 50% Pb	In	72,8	[7]
Ra- α -Be	50% H_2O ; 50% Fe	In	57,9	[7]
Po- α -Be	50% H_2O ; 50% Zr	(0,025)	~ 92	[7]
Спектр деления	D_2O	In	109 ± 3	[14]
» »	D_2O	(0,025)	120	[1]
Спектр деления	Be (1,85)	In	$80,2 \pm 0,2$	[14]
Ra- α -Be	Be (1,78)	In	120 ± 23	[14]

Таблица 41.4

Время замедления t нейтронов от $E_n = 2$ Мэв до энергии $E_k = 0,025$ эв [1, 6]

Замедлитель	$\bar{\lambda}_{\text{рас}}$, см	t , 10^{-5} сек
Вода	1,1	1,0
Тяжелая вода	2,6	4,6
Бериллий	1,6	6,7
Оксид бериллия	1,5	7,8
Графит	2,6	15,0

Возраст нейтронов τ . Дифференциальное уравнение теории замедления в среде без поглощения (уравнение возраста Ферми) имеет вид

$$\nabla^2 q(r, \tau) = \frac{\partial q(r, \tau)}{\partial \tau},$$

где q — плотность замедления, или число нейтронов в 1 см³, пересекающих за 1 сек данное значение энергии E при движении по энергетической шкале. Символический возраст нейтронов

$$\tau(E_k) = \int_{E_k}^{E_n} \frac{D}{\xi \mu_{\text{рас}} E} dE = \int_0^1 D v dt;$$

D — коэффициент диффузии; $\mu_{\text{рас}}$ — макроскопическое сечение рассеяния; v — скорость нейтрона; t — время замедления до энергии E_k .

Возраст нейтронов τ равен 1/6 среднего квадрата смещения нейтрона (по прямой) при замедлении от энергии E_n до энергии E_k : $\tau(E_n \rightarrow E_k) = \bar{r}^2 / 6$.

Таблица 41.5

Источник нейтронов	Замедлитель (плотность см^3)	Детектор (E_K , эв)	Возраст τ , см^2	Литература
Спектр деления	Be (1,84)	(0,025)	97,2	[1]
» »	BeO (2,96)	In	$93,4 \pm 4,7$	[14]
» »	BeO	(0,025)	105 ± 10	[7]
Sb- γ -Be (0,025)	Графит	In	142—147	[14, 7]
Спектр деления	»	In	$312,5 \pm 0,5$	[14]
Ra- α -Be	»	In	~ 380	[14]
Pu- α -Be	»	In	~ 416	[14]
Po- α -Be	»	In	614	[8]
Спектр деления	»	(0,025)	350	[1]
» »	Дифенил	In	$54,2 \pm 2,4$	[10]
Po- α -Be	»	In	$106,5 \pm 6,8$	[10]

Таблица 41.6

Возраст нейтронов спектра деления в смеси $\text{D}_2\text{O} - \text{H}_2\text{O}$ до энергии резонанса индия [1]

Отношение объемов $\frac{V(\text{D}_2\text{O})}{V(\text{H}_2\text{O})}$	Возраст τ , см^2
99,8	109 ± 3
99,0	107 ± 5
98,4	106 ± 3
95,3	93 ± 3
94,0	86 ± 3
91,8	78 ± 3

Диффузия нейтронов

Элементарное уравнение диффузии нейтронов (диффузионное уравнение) имеет вид

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \text{div} (D \text{grad } \Phi - \nu_{\text{полг}} \Phi + S),$$

где Φ — плотность потока нейтронов, $\text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$; S — плотность источников см^{-3} ; $D = \nu_{\text{рас}} / (3\nu_{tr} (\nu_{\text{полг}} + \nu_{\text{рас}}))$ — коэффициент диффузии, см [при $\nu_{\text{полг}} \ll \nu_{\text{рас}}$ $D \approx 1/(3\nu_{tr})$]; $\nu_{\text{полг}}$ — макроскопическое сечение поглощения; ν_{tr} — транспортное сечение связанное с транспортной длиной свободного пробега выражением

$$\lambda_{tr} = \frac{1}{\mu_{tr}} = \frac{\lambda_{\text{рас}}}{1 - \cos \psi} = \frac{1}{\nu_{\text{рас}} (1 - \cos \psi)}.$$

$L = \sqrt{D/\nu_{\text{полг}}}$ — длина диффузии ($L^2 = \bar{r}^2/6$, где $\bar{r}$ — расстояние по прямой линии от точки возникновения нейтрона до захвата); $t = \lambda_{\text{полг}}/v = 1/(\nu_{\text{полг}} v)$ — время диффузии, или время жизни теплового нейтрона.

В непоглощающей среде, имеющей температуру T , нейтроны, находящиеся в тепловом равновесии со средой, имеют максвелловское распределение по скоростям, причем T называют температурой нейтронов.

Таблица 41.7

Максвелловское распределение и средние величины [7]
Обозначения: m — масса нейтрона; v — скорость; k — постоянная Больцмана; T — температура, °K.

Величина	Формула или значение
Нормированное распределение по скоростям	$n(v) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-mv^2/(2kT)}$
Наиболее вероятная скорость	$v_{в.в} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = 128,4 \sqrt{T} \text{ м/сек}$
Средняя скорость	$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{\pi m}} = 1,128 v_{в.в}$
Энергия, соответствующая наиболее вероятной скорости	$mv_{в.в}^2/2 = kT = 8,61 \cdot 10^{-5} T \text{ эв}$
Нормированное распределение по энергии	$n(E) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} (kT)^{-3/2} \sqrt{E} e^{-E/kT}$
Наиболее вероятная энергия	$kT/2$
Средняя энергия	$m\bar{v}^2/2 = 3kT/2$
Энергия, при которой плотность потока $n(E) \cdot v(E)$ максимальна	kT

Таблица 41.8

Время жизни тепловых нейтронов t в некоторых замедлителях [14]

Замедлитель	Плотность, g/cm^3	$\lambda_{\text{полг}}, cm$	$t, msec$
H ₂ O	1,0	52,8	0,213
D ₂ O	1,1	32 200	130
D ₂ O (99,8 мол. %)	1,1	14 300	57,6
Графит	1,6	3210	12,9
Be	1,85	910	3,65
BeO	2,96	1 880	7,6
Парафин	0,87	44	0,178
Плексиглас	1,18	57,7	0,232
Даутерм А*	1,06	87	0,348
Гидрид циркония	3,48	65,7	0,266

* Дифенил и оксидифенил в отношении 0,36:1.

Продолжение табл. 41.9

Вещество	Плотность, g/cm^3	$\nu_{\text{полг}}, cm^{-1}$	$\nu_{\text{рас}}, cm^{-1}$	L, cm	D, cm
Co	8,71	3,38	0,623	0,40	0,541
Ni	8,75	0,413	1,57	0,228	0,215
Cu	8,94	0,326	0,610	1,30	0,552
Zn	7,14	0,0724	0,237	4,43	1,42
Ga	5,90	0,143	0,204	3,40	1,65
Ge	5,46	0,111	0,136	4,72	2,48
As	3,70	0,128	0,179	3,84	1,88
Se	4,5	0,422	0,378	1,45	0,890
Br	3,12	0,158	0,141	3,88	2,38
Kr	3,71 · 10 ⁻³	8,27 · 10 ⁻⁴	1,97 · 10 ⁻⁴	1460	1750
Rb	1,53	7,87 · 10 ⁻³	0,130	18,3	2,55
Sr	2,54	0,0211	0,175	9,54	1,92
Y	5,51	0,0489	0,112	7,57	2,75
Zr	6,44	0,00787	0,340	11,2	0,987
Nb	8,4	0,0632	0,272	4,42	1,23
Mo	10,2	0,173	0,448	2,08	0,749
Tc	11,5	1,54	—	—	—
Ru	12,1	0,185	0,433	2,05	0,776
Rh	12,4	10,8	0,363	0,292	0,924
Pd	12,2	0,551	0,248	1,57	1,35
Ag	10,5	3,69	0,352	0,508	0,953
Cd	8,65	114	0,325	0,0949	1,03
In	7,28	7,30	0,0840	0,739	3,99
Sn	7,29	0,0231	0,148	9,90	2,27
Sb	6,22	0,175	0,132	3,80	2,53
Te	6,02	0,134	0,142	4,20	2,36
I	4,94	0,164	0,0844	4,92	3,97
Xe	5,85 · 10 ⁻³	9,3 · 10 ⁻⁴	1,15 · 10 ⁻³	1770	2890
Cs	1,87	0,238	0,170	2,02	1,96
Ba	3,5	0,0184	0,123	12,2	2,73
La	6,15	0,237	0,403	1,86	0,825
Ce	6,9	0,0217	0,266	7,6	1,25
Pr	6,48	0,313	0,111	3,1	3,0
Nd	6,96	1,34	0,464	0,73	0,72
Sm	7,75	174	0,155	0,112	2,15
Eu	5,22	89	0,166	0,151	2,02
Gd	7,95	1410	—	—	—
Tb	8,33	1,45	—	—	—
Dy	8,56	30,1	3,17	0,187	0,105
Ho	8,76	2,08	—	—	—
Er	9,16	5,7	0,495	0,344	0,67
Tu	9,35	4,23	0,233	0,582	1,43
Yb	7,01	0,903	0,293	1,12	1,14
Lu	9,74	3,76	—	—	—
Hf	13,3	4,71	0,359	0,444	0,931
Ta	16,6	1,16	0,276	1,02	1,21
W	18,9	1,19	0,310	0,953	1,08
Re	21,0	5,84	0,95	0,175	0,252
Os	22,5	1,12	—	—	—
Ir	22,4	30,9	—	—	—
Pt	21,4	0,582	0,661	0,932	0,506
Au	19,3	5,83	0,549	0,323	0,609
Hg	13,6	15,5	0,817	0,163	0,410
Tl	11,9	0,119	0,491	2,39	0,681
Pb	11,3	5,59 · 10 ⁻³	0,361	12,9	0,925
Bi	9,7	9,5 · 10 ⁻⁴	0,252	37,2	1,33
Rn	9,73 · 10 ⁻³	5,28 · 10 ⁻³	—	—	—
²²⁷ Ac	10,0	15,9	—	—	—
Th	11,5	0,226	0,374	2,7	1,65
Pa	15,4	—	—	—	—
U	18,7	0,363	0,393	1,55	3,08
UO ₂	10	0,169	0,372	1,9	0,615
²³⁹ Pu	19,74	57,0	0,478	0,0708	0,286

Таблица 41.9

Тепловые диффузионные постоянные веществ [1,5]

Вещество	Плотность, g/cm^3	$\nu_{\text{полг}}, cm^{-1}$	$\nu_{\text{рас}}, cm^{-1}$	L, cm	D, cm
H	8,99 · 10 ⁻⁵	1,78 · 10 ⁻⁵	2,04 · 10 ⁻³	5200	482
H ₂ O	1,00	0,022	3,45	2,767 ± ± 0,008 [14]	0,164
D ₂ O	1,10	3,05 · 10 ⁻⁵	0,449	116 ± 4	0,62
He	1,78 · 10 ⁻⁴	1,88 · 10 ⁻⁷	2,14 · 10 ⁻⁵	10 ⁵	1,87 · 10 ⁴
Li	0,534	3,29	0,0649	1,31	5,68
Be	1,84	1,23 · 10 ⁻³	0,861	20,8 ± 0,5	0,532
BeO	2,8	6,2 · 10 ⁻⁴	0,760	32,7 ± 0,5 [14]	0,75
B	2,45	108	0,546	0,077	0,650
C	1,60	2,99 · 10 ⁻⁴	0,385	51 ± 3	0,886
N	1,25 · 10 ⁻³	1,01 · 10 ⁻⁴	5,38 · 10 ⁻⁴	2540	651
O	1,43 · 10 ⁻³	1,04 · 10 ⁻³	2,26 · 10 ⁻⁴	3,78 · 10 ⁵	1540
F	1,70 · 10 ⁻³	5,39 · 10 ⁻⁷	2,1 · 10 ⁻⁴	5,51 · 10 ⁴	1640
Ne	0,90 · 10 ⁻³	7,52 · 10 ⁻⁵	6,45 · 10 ⁻⁵	8430	5350
Na	0,971	0,0134	0,102	15,9	3,37
Mg	1,74	2,97 · 10 ⁻³	0,155	27,3	2,21
Al	2,70	0,0145	0,0844	16,7	4,05
Si	2,35	8,07 · 10 ⁻³	0,0857	22,2	3,98
P	1,83	7,12 · 10 ⁻³	0,178	16,4	1,91
S	2,1	0,0205	0,0434	19,5	7,84
Cl	3,21 · 10 ⁻³	1,84 · 10 ⁻³	8,73 · 10 ⁻⁴	459	389
Ar	1,78 · 10 ⁻³	1,77 · 10 ⁻⁵	4,03 · 10 ⁻⁵	2,17 · 10 ⁴	8400
K	0,87	0,0278	0,0201	24,7	16,9
Ca	1,54	0,0102	0,0696	21,8	4,87
Sc	2,5	0,804	0,804	0,724	0,421
Ti	4,5	0,328	0,226	2,13	1,49
V	5,96	0,352	0,352	1,65	0,959
Cr	6,92	0,248	0,240	2,37	1,40
Mn	7,42	1,07	0,187	1,30	1,80
Fe	7,86	0,222	0,933	1,28	0,362

Таблица 41.10

Диффузионные постоянные D_2O с примесью H_2O
при температуре $T = 300^\circ K$ [11]

Примесь H_2O в D_2O , %	$D_{полд}^{-1}$ см (при $v=2200$ м/сек)	$D_{рас}^{-1}$ см	L^2 , см ²
0	26500	2,88	25400
0,1	16800	2,87	16100
0,2	12300	2,85	11700
0,3	9670	2,84	9150
0,4	7980	2,82	7500
0,5	6800	2,81	6350
0,6	5920	2,80	5550
0,7	5240	2,78	4850
0,8	4700	2,77	4350
0,9	4270	2,76	3930
1,0	3900	2,74	3560

Таблица 41.11

Значение альbedo тепловых нейтронов для плоских
отражателей из различных рассеивающих
материалов [14]

Рассеиватель	Толщина отражателя			
	20 см	40 см	60 см	∞
H_2O	0,811	0,811	0,811	0,811
D_2O	0,853	0,922	0,947	0,981
Be	0,881	0,907	0,910	0,911
Графит	0,834	0,903	0,923	0,936

41.5. КОГЕРЕНТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ НЕЙТРОНОВ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

* Когерентное рассеяние нейтронов. В сечении рассеяния нейтронов с энергиями $\leq 0,1$ эв принято выделять когерентную σ_K и некогерентную $\sigma_{нек}$ части. Упорядоченное расположение ядер рассеивателя приводит к постоянству фазовых соотношений рассеянных от разных ядер нейтронных волн, т. е. приводит к когерентному (интерференционному) рассеянию. Случайное положение спинов нейтронов и рассеивающих ядер, а также хаотическое расположение изотопов в атомах рассеивателя приводят к «спиновой» и «изотопической» некогерентности составляющим в $\sigma_{нек}$. Когерентная и некогерентная составляющие сечения характеризуются своими амплитудами рассеяния b_K и $b_{нек}$:

$$b_K = \frac{I+1}{2I+1} b_+ + \frac{I}{2I+1} b_-;$$

$$b_{нек} = \frac{\sqrt{I(I+1)}}{2I+1} (b_+ - b_-),$$

где I — спин рассеивающего ядра, амплитуды b_+ и b_- характеризуют рассеяние в состояниях, когда полный спин ядра и нейтрона соответственно равны $J = I + 1/2$ и $J = I - 1/2$. Сечения процессов находятся в умножением квадратов амплитуд на 4π , например $\sigma_K = 4\pi |b_K|^2$. Температурные колебания атомов в решетке изменяют величину σ_K . Этот эффект учитывается множителем Дебая — Уоллера, см., например, [12].

Таблица 41.12

Сечения когерентного рассеяния σ_K (со знаком) [12]

Ядро	σ_K , барн	Ядро	σ_K , барн
^1H	$1,79 \pm 0,02$ (—)	Ge	$8,8 \pm 0,5$ (+)
^2D	$5,4 \pm 0,3$ (+)	^{76}As	$5,0 \pm 0,3$ (+)
He	$1,1 \pm 0,2$ (+)	Se	$10 \pm 0,6$ (+)
Li	$0,40 \pm 0,03$ (—)	Br	$5,7 \pm 0,4$ (+)
^6Li	6 ± 3 (+)	Kr	$7,2 \pm 0,4$
^7Li	$0,80 \pm 0,05$ (—)	Rb	$3,8 \pm 0,3$ (+)
^9Be	$7,53 \pm 0,07$ (+)	Sr	$4,1 \pm 0,3$ (+)
C	$5,50 \pm 0,04$	^{89}Y	$8,05 \pm 0,25$ (+)
^{13}C	$4,5 \pm 0,6$ (+)	Zr	$6,3 \pm 0,3$ (+)
N	$11,0 \pm 0,5$ (+)	Nb	$6,0 \pm 0,2$ (+)
O	$4,2 \pm 0,3$ (+)	Mo	$5,6 \pm 0,2$ (+)
^{19}F	$3,8 \pm 0,3$ (+)	Rh	$4,5 \pm 0,5$ (+)
Na	$1,55 \pm 0,05$ (+)	Pd	$5,0 \pm 0,3$ (+)
Mg	$3,60 \pm 0,10$ (+)	Ag	$4,6 \pm 0,3$ (+)
^{27}Al	$1,50 \pm 0,10$ (+)	^{107}Ag	$8,7 \pm 0,5$ (+)
Si	$2,0 \pm 0,20$ (+)	^{109}Ag	$2,3 \pm 0,2$ (+)
^{31}P	$3,10 \pm 0,16$ (+)	Sn	$4,6 \pm 0,3$ (+)
S	$1,20 \pm 0,08$ (+)	Sb	$3,7 \pm 0,3$ (+)
Cl	$1,21 \pm 0,80$ (+)	Te	$4,0 \pm 0,3$ (+)
Ar	$0,5 \pm 0,10$ (—)	^{120}Te	$3,5 \pm 0,7$
^{36}Ar	72 ± 5 (+)	^{123}Te	$4,2 \pm 0,5$
K	$1,5 \pm 0,1$ (+)	^{130}Te	$4,1 \pm 0,4$
Ca	$3,0 \pm 0,1$ (+)	^{127}I	$3,4 \pm 0,2$ (+)
^{40}Ca	$3,0 \pm 0,1$ (+)	Xe	$3,0 \pm 0,2$ (+)
^{44}Ca	$0,4 \pm 0,03$ (+)	^{133}Cs	$3,0 \pm 0,2$ (+)
^{45}Sc	$17,5 \pm 1,5$	Ba	$3,5 \pm 0,2$ (+)
Ti	$1,4 \pm 0,3$ (—)	La	$8,7 \pm 0,3$ (+)
^{46}Ti	$2,9 \pm 0,1$ (+)	Ce	$2,7 \pm 0,2$ (+)
^{47}Ti	$1,4 \pm 0,1$ (+)	^{140}Ce	$2,8 \pm 0,11$ (+)
^{48}Ti	$4,2 \pm 0,2$ (—)	^{142}Ce	$2,6 \pm 0,2$ (+)
^{49}Ti	$0,08 \pm 0,02$ (+)	^{141}Pr	$2,4 \pm 0,2$ (+)
^{50}Ti	$3,8 \pm 0,2$ (+)	Nd	$6,5 \pm 0,4$ (+)
V	$0,032 \pm 0,008$ (—)	^{141}Nd	$7,5 \pm 0,6$ (+)
Cr	$1,56 \pm 0,03$ (+)	^{144}Nd	$1,0 \pm 0,2$ (+)
Mn	$1,7 \pm 0,1$ (—)	^{146}Nd	$9,5 \pm 0,4$ (+)
Fe	$11,37 \pm 0,05$ (+)	^{152}Sm	3 ± 1 (—)
^{54}Fe	$2,20 \pm 0,13$ (+)	^{154}Sm	8 ± 2 (+)
^{56}Fe	$12,8 \pm 0,2$ (+)	Er	$7,8 \pm 0,4$ (+)
^{57}Fe	$0,64 \pm 0,04$ (+)	^{181}Ta	$6,1 \pm 0,4$ (+)
^{58}Co	$1,00 \pm 0,06$ (+)	W	$2,74 \pm 0,05$ (+)
Ni	$13,2 \pm 0,2$ (+)	Os	$15,2 \pm 1,5$
^{58}Ni	$25,9 \pm 0,3$ (+)	Pt	$11,2 \pm 0,7$ (+)
^{60}Ni	$1,1 \pm 0,1$ (+)	Au	$7,3 \pm 0,1$ (+)
^{62}Ni	$9,5 \pm 0,1$ (+)	Hg	22 ± 2 (+)
Cu	$7,5 \pm 0,2$ (+)	Tl	10 ± 1 (+)
^{63}Cu	$5,7 \pm 0,3$	Pb	$11,5 \pm 2$ (+)
^{65}Cu	$15,5 \pm 0,6$	^{209}Bi	$9,95 \pm 0,04$ (+)
Zn	$4,3 \pm 0,3$ (+)		

Дифракция нейтронов. При прохождении пучка медленных нейтронов через кристалл возникают вторичные, дифрагированные (т. е. «отраженные») кристаллическими плоскостями пучки нейтронов. Направленные пучков, дифрагированных кристаллом, определяются условиями Вульфа—Брегга: $\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta$, где d_{hkl} — межплоскостное расстояние для плоскостей с индексами h, k, l ; θ — угол отражения.

Преломление и отражение нейтронов. При пересечении границы двух сред нейтронный пучок так же, как и луч света, отражается и преломляется. Показатель преломления n рассчитывается по формуле $n^2 - 1 = -\lambda^2 N b_K / \pi$, где N — число атомов в 1 см³, b_K — амплитуда когерентного рассеяния и λ — длина волны падающих

нейтронов. Влияние поглощения среды на показатель преломления незначительно. Например, для кадмия при учете поглощения показатель преломления меняется на 0,5% для нейтронов с $\lambda = 2 \text{ \AA}$.

Рассеяние нейтронов в среде, магнитные моменты атомов которой имеют упорядоченную ориентацию (ферро-, ферри-, антиферромагнетики), является когерентным. Показатель преломления в этом случае определяется из выражения $n^2 - 1 = -\lambda^2 N b_k / \pi \pm \mu B / E$, где μ — магнитный момент нейтрона; E — его энергия и B — магнитная индукция насыщения.

Предельный угол скольжения θ_c для полного отражения нейтронов от зеркала равен

$$\theta_c = \lambda \sqrt{N b_k / \pi}.$$

Таблица 41.13

Предельные углы полного отражения нейтронов

с $\lambda = 1,873 \text{ \AA}$ [12]

Зеркало	θ_c	Зеркало	θ_c
Be	12,0'	Ni	11,5'
C	10,5'	Zn	7,1'
Fe	10,7'	Cu	9,5'

Кристаллические нейтронные фильтры. Для системы беспорядочно ориентированных кристаллитов в поликристаллическом нейтронном фильтре условие Вульфа — Брега удовлетворяется только для нейтронов с длиной волны $\lambda < 2d_m$, где d_m — максимальное межплоскостное расстояние кристаллической решетки. При прохождении пучка нейтронов через такой фильтр из пучка вследствие когерентного рассеяния будут выводиться нейтроны с $\lambda < 2d_m$. Ослабление нейтронов с $\lambda > 2d_m$ происходит за счет процессов некогерентного упругого рассеяния, теплового неупругого рассеяния и поглощения. Для многих веществ сечения последних трех процессов много меньше, чем сечение когерентного рассеяния, поэтому в пучке, прошедшем через фильтр, практически отсутствуют нейтроны с $\lambda < 2d_m$.

Таблица 41.14

Граничные длины волн для кристаллических нейтронных фильтров [13]

Вещество	$\lambda_{gr}, \text{ \AA}$	$E_{gr}, \text{ эв}$
Be	3,95	0,00520
BeO	4,40	0,00420
Pb	5,70	0,00250
Графит	6,69	0,00183
Bi	8,00	0,00128

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гордеев И. В., Кардашев Д. А., Малышев А. В. Ядерно-физические константы. М., Госатомиздат, 1963.
- Юз Д., Шварц Р. Атлас нейтронных сечений. М., Атомиздат, 1959.
- Schmidt J. J. Neutron cross section for fast reactor materials. Karlsruhe, 1962.
- Вейнберг А., Вигнер Е. Физическая теория ядерных реакторов. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
- «Атомная энергия», 1958, т. 5, вып. 1, с. 82.
- Глестон С., Эдлунд М. Основы теории ядерных реакторов. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1954.
- Физика ядерных реакторов. Пер. с англ. Под ред. Стенсока И. А. М., Атомиздат, 1964.
- Шалашов Ю. П. «Атомная энергия», 1965, т. 18, вып. 3, с. 282.
- Григорьев И. С. «Атомная энергия», 1967, т. 23, вып. 4, с. 352.
- Юрова Л. Н. и др. В кн.: «Нейтронная физика». М., Атомиздат, 1961, с. 192.
- Галанин А. Д. Теория ядерных реакторов на тепловых нейтронах. М., Атомиздат, 1959.
- Кёртис Л. Введение в нейтронную физику. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1965.
- Гуревич И. И., Тарасов Л. В. Физика нейтронов низких энергий. М., «Наука», 1965.
- Бекурц К., Виртц К. Нейтронная физика. Пер. с нем. М., Атомиздат, 1968.

ГЛАВА 42

ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР

42.1. ВВЕДЕНИЕ

Деление атомного ядра — это процесс распада возбужденного ядра на 2 (реже 3 и 4) сравнимых по массе ядра-осколка деления. Деление ядер сопровождается испусканием вторичных нейтронов, γ -квантов и выделением энергии. Делению подвержены ядра всех тяжелых элементов, если только они находятся в достаточно высоких возбужденных состояниях. Процесс деления — это один из возможных путей снятия возбуждения ядра; другие конкурирующие процессы: испускание γ -квантов, испускание нейтронов и т. п.

Энергию возбуждения можно сообщить ядру облучением его γ -квантами или бомбардировкой его части-

цами высокой энергии. При неупругом соударении частица может передать ядру часть своей энергии, которая пойдет на возбуждение ядра. Еще один путь получения возбужденного ядра — это образование составного ядра при столкновении с частицей. Особо важное значение имеет процесс образования составных ядер при захвате нейтронов.

Порог деления, вызванного γ -квантами (т. е. энергия наиболее мягких γ -квантов, еще способных вызвать деление), является непосредственной мерой минимальной энергии возбуждения ядра, необходимой для деления. Порог реакции деления под действием нейтронов меньше порога фотоделения составного ядра на величину энергии связи нейтрона с ядром мишени. Поэтому

некоторые из порогов реакции деления ядер под действием нейтронов отрицательны. Это означает, что процесс деления возможен при захвате ядрами тепловых и холодных нейтронов. Такие ядра называются делющимися.

Кроме указанных механизмов возбуждения ядер, которые приводят к делению, возможен процесс деления ядер без каких-либо видимых внешних воздействий на ядро. Такой процесс называется спонтанным делением. Вероятность спонтанного деления несоизмеримо меньше вероятности распада тех же ядер, находящихся в возбужденном состоянии. Например, константа распада ($\Gamma/\hbar$) для спонтанного деления ^{238}U приблизительно равна $10^{-24} \text{ сек}^{-1}$, а для возбужденного состояния с энергией возбуждения выше порога деления $\Gamma/\hbar \sim 10^{14} \text{ сек}^{-1}$.

После захвата нейтрона образуется составное ядро. Время жизни составного ядра по отношению к делению $\tau = \hbar/\Gamma \approx 10^{-14} \text{ сек}$, это время значительно превышает время, в течение которого нейтрон с энергией 1 Мэв пролетает поперечник ядра ($\sim 10^{-21} \text{ сек}$).

Образующиеся при распаде ядра осколки в большинстве случаев имеют разные массы, например при делении ядер урана масса легкого осколка 90—100 а. е. м., а тяжелого 130—140 а. е. м. Скорости осколков $\sim 10^9 \text{ см/сек}$. Импульсы осколков равны и противоположны по знаку. Скорость осколков достигает 90% конечного значения уже при расстоянии между ними $\sim 10^{-11} \text{ см}$, т. е. когда они еще находятся внутри наименьшей электронной оболочки атома. Осколки деления первоначально находятся в возбужденных состояниях. Их суммарная энергия возбуждения $\sim 20 \text{ Мэв}$. Возбужденные осколки деления ведут себя так же, как и другие возбужденные ядра: они распадаются с испусканием частиц и γ -квантов. Поскольку осколки имеют большие заряды и переобгащены нейтронами, то испускание нейтронов наиболее вероятно. Время жизни осколков по отношению к испусканию нейтронов $\sim 10^{-17} \text{ сек}$. Эти нейтроны, испускаемые при делении ядер возбужденными осколками, называются «мгновенными нейтронами деления». Средняя энергия возбуждения осколка после испускания нейтронов равна половине энергии связи нейтрона и равна для обоих осколков 6—7 Мэв. Эта энергия излучается в виде γ -квантов за время, характерное для испускания γ -квантов, т. е. около 10^{-14} сек .

В начале своего пути осколки имеют положительный заряд от 10 до 20 электронных зарядов, так как некоторые из орбитальных электронов составного ядра «отрываются» при делении. Проходя через вещество, осколки теряют свою энергию в основном на ионизацию среды. Вдоль пути двух осколков образуется $\sim 5 \cdot 10^6$ пар ионов. Замедлившиеся осколки захватывают электроны и к моменту, когда их энергия уменьшается до тепловой энергии среды, становятся электрически нейтральными. Время замедления осколков в воздухе $\sim 10^{-9} \text{ сек}$, а в плотных средах $\sim 10^{-12}$ — 10^{-13} сек . За это время они пробегают в воздухе расстояние $\sim 2 \text{ см}$, а в плотных средах $\sim 10^{-3} \text{ см}$.

Заряд замедлившихся осколков (называемых обычно продуктами деления) сильно отличается от заряда стабильных атомов с той же массой. Это различие уменьшается в результате серии β -распадов (обычно трех или четырех для каждого осколка).

В отдельных случаях β -распад продуктов деления приводит к высоковозбужденным состояниям дочернего ядра, для которых возможен выброс нейтрона. Так как константа распада по отношению к эмиссии этого «запаздывающего» нейтрона намного превышает константу β -распада, то испускание нейтронов будет следовать за β -распадом материнского ядра почти мгновенно и временная зависимость интенсивности запаздывающих нейтронов будет такая же, как у β -распада материнского ядра.

42.2. СПОНТАННОЕ ДЕЛЕНИЕ

При спонтанном делении наблюдается самопроизвольный развал ядра на осколки (обычно 2) и некоторое количество свободных нейтронов. Кинетическая энергия осколков составляет около 150 Мэв. Процесс деления сопровождается эмиссией нескольких γ -квантов. Усредненное по достаточно большому количеству распадов, число нейтронов, появляющихся в результате деления ядра, называют средним числом нейтронов на акт деления $\bar{\nu}$.

Таблица 42.1

Периоды полураспада по отношению к спонтанному делению и средние числа нейтронов $\bar{\nu}$, испускаемых на акт деления

Ядро	$T_{1/2}$, годы	$\bar{\nu}$	Литература
^{230}Th	$1,5 \cdot 10^{17}$	$1,24 \pm 0,15^*$	[2, 3]
^{232}Th	$1,4 \cdot 10^{18}$	—	[4]
^{238}Th	—	$1,36 \pm 0,15^*$	[3]
^{230}Pa	$> 10^{16}$	—	[4]
^{231}Pa	10^{16}	—	[3]
^{232}U	$8 \cdot 10^{18}$	—	[2]
^{238}U	$> 3 \cdot 10^{17}$	—	[3]
^{234}U	$2 \cdot 10^{16}$	$1,63 \pm 0,15^*$	[2, 3]
^{235}U	$1,9 \cdot 10^{17}$	—	[2]
^{236}U	$2 \cdot 10^{16}$	$1,58 \pm 0,15^*$	[2, 3]
^{238}U	$8 \cdot 10^{16}$	$2,30 \pm 0,20$	[2]
^{239}U	—	$1,71 \pm 0,15^*$	[3]
^{237}Np	$> 4 \cdot 10^{16}$	—	[3]
^{238}Np	—	$1,67 \pm 0,15$	[3]
^{239}Np	$> 5 \cdot 10^{12}$	—	[2]
^{236}Pu	$3,5 \cdot 10^9$	$2,17 \pm 0,20$	[2]
^{238}Pu	$4,9 \cdot 10^{10}$	$2,28 \pm 0,10$	[2]
^{239}Pu	$5,5 \cdot 10^{16}$	—	[3]
^{240}Pu	$1,2 \cdot 10^{11}$	$2,23 \pm 0,05$	[2]
^{242}Pu	$6,8 \cdot 10^{10}$	$2,28 \pm 0,13$	[2]
^{244}Pu	$2,5 \cdot 10^{10}$	—	[2]
^{241}Am	$> 1,4 \cdot 10^{13}$	—	[3]
^{242}Am	—	$2,42 \pm 0,15^*$	[3]
^{240}Cm	$7,9 \cdot 10^6$	—	[1]
^{242}Cm	$7,2 \cdot 10^6$	$2,59 \pm 0,11$	[2]
^{244}Cm	$1,4 \cdot 10^7$	$2,82 \pm 0,09$	[2]
^{246}Cm	$1,7 \cdot 10^7$	—	[1]
^{248}Cm	$4,6 \cdot 10^6$	—	[2]
^{250}Cm	$1,7 \cdot 10^4$	—	[1]
^{249}Bk	$6 \cdot 10^8$	$3,72 \pm 0,16$	[2, 3]
^{246}Cf	$2,1 \cdot 10^8$	$2,92 \pm 0,9$	[2]
^{248}Cf	$7 \cdot 10^8$	—	[2]
^{249}Cf	$1,5 \cdot 10^9$	—	[3]
^{250}Cf	$1,5 \cdot 10^4$	—	[2]
^{252}Cf	85	$3,78 \pm 0,04$	[1, 2, 4]
^{254}Cf	55,6 дня	$3,90 \pm 0,14$	[2]
^{253}Es	$6,4 \cdot 10^5$	—	[1]
^{254}Es	$1,5 \cdot 10^5$	—	[2]
^{255}Fm	> 8	—	[1]
^{254}Fm	0,675	$4,05 \pm 0,19$	[1, 2]
^{256}Fm	10^4	—	[1]
^{256}Fm	2,7 ч	—	[1]
^{257}Fm	100	—	[1]
^{256}Md	3,5 ч	—	[2]
^{260}Ku	0,3 сек	—	[1]

* Значение экстраполировано от полученного при измерениях с тепловыми или быстрыми нейтронами.

42.3. СЕЧЕНИЯ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

На рис. 42.1—42.4 представлены графики зависимостей сечения деления некоторых ядер от энергии нейтрона

Таблица 42.2

Сечения деления σ_f ядер под действием тепловых нейтронов ($\varphi = 2200$ м/сек) [4]

$\bar{\nu}$ — число вторичных нейтронов, выпускаемых на акт деления. Значения, отмеченные звездочкой, получены для распределения нейтронов в реакторе.

Ядро	σ_f , барн	$\bar{\nu}$	Ядро	σ_f , барн	$\bar{\nu}$	Ядро	σ_f , барн	$\bar{\nu}$
^{223}Ra	<100	—	^{234}Pa	<500	—	^{236}Pu	170 ± 35	—
^{226}Ra	$<10^{-4}$	—	^{230}U	25 ± 10	—	^{237}Pu	2500 ± 200	—
^{228}Ra	<2	—	^{231}U	400 ± 300	—	^{238}Pu	$16,8 \pm 0,3$	—
^{227}Ac	<2	—	^{232}U	80 ± 20	—	^{239}Pu	742 ± 4	$2,89 \pm 0,04$
^{227}Th	1500 ± 1000	—	^{233}U	525 ± 4	$2,51 \pm 0,02$	^{240}Pu	$0,030 \pm 0,045$	—
^{228}Th	$<0,3$	—	^{234}U	$<0,65$	—	^{241}Pu	1025 ± 10	$2,96 \pm 0,08$
^{229}Th	$30,5 \pm 3$	$2,13 \pm 0,03$	^{235}U	582 ± 4	$2,44 \pm 0,02$	^{242}Pu	$0,3$	—
^{230}Th	$<10^{-3}$	$2,13 \pm 0,03$	^{238}U	$6 \cdot 10^{-4}$	—	^{241}Am	$3,1 \pm 0,2$	$3,35 \pm 0,04$ [5]
^{232}Th	$(6 \pm 2) 10^{-5}$	—	^{239}U	$14 \pm 3^*$	—	^{242}Am	2500 ± 1000	$3,39 \pm 0,04$ [5]
^{233}Th	$15 \pm 2^*$	—	^{234}Np	900 ± 300	—	^{243}Am	$6400 \pm 500^*$	—
^{234}Th	$<10^{-2}$	—	^{236}Np	2800 ± 800	—	^{244}Am	$<7,5 \cdot 10^{-2}$	—
^{230}Pa	1500 ± 250	—	^{237}Np	19 ± 3	$2,96 \pm 0,5$	^{242}Cm	$<5^*$	—
^{231}Pa	$(10 \pm 5) 10^{-3}$	—	^{238}Np	1600 ± 100	—	^{243}Cm	700 ± 50	—
^{232}Pa	700 ± 100	—	^{239}Np	<1	—	^{245}Cm	1900 ± 200	$3,39 \pm 0,05$ [5]
^{233}Pa	$<0,1$	—				^{249}Cf	$600 \pm 400^*$	—

42.4. НЕЙТРОНЫ ДЕЛЕНИЯ

Таблица 42.4

Энергетические спектры мгновенных нейтронов деления. Спектры деления различных ядер весьма подобны. В простейшем виде, в пределах ошибок эксперимента, спектры нейтронов деления могут быть представлены максвелловским распределением [9, 14]:

$$N(E) = \frac{2}{\sqrt{\pi} \bar{E}^3} \sqrt{E} e^{-E/\bar{E}},$$

где E — энергия нейтрона в лабораторной системе координат, а параметр $\bar{E}$ связан со средней энергией спектра $\bar{E}$:

$$\bar{E} = 3\bar{E}/2.$$

Таблица 42.3

Средние энергии энергетических распределений мгновенных нейтронов для различных изотопов

Ядро	Вид деления	$\bar{E}$, Мэв	Литература
^{233}U	Тепловыми нейтронами	$1,96 \pm 0,05$	[14]
^{235}U	»	$1,935 \pm 0,05$	[14]
^{239}Pu	»	$2,00 \pm 0,05$	[14]
^{240}Pu	Спонтанное	1,86	[10]
^{241}Pu	Тепловыми нейтронами	$2,002 \pm 0,051$	[4]
^{252}Cf	Спонтанное	$2,2 \pm 0,1$	[14]

Среднее число вторичных нейтронов $\bar{\nu}$, возникающих при делении ядра, имеет тенденцию увеличиваться с возрастанием энергии нейтронов E_n , вызывающих деление. Эта зависимость может быть представлена выражением

$$\bar{\nu}(E_n) = \bar{\nu}_0 + aE_n,$$

где E_n — энергия нейтронов, вызывающих деление, и $\bar{\nu}_0$ — среднее число вторичных нейтронов при делении тепловыми нейтронами. Параметр a слабо зависит от энергии нейтрона.

Среднее число вторичных нейтронов [4]

Ядро	E_n , Мэв	$\bar{\nu}$
^{232}Th	1,40	$2,35 \pm 0,08$
	1,45	2,4
	2,3	$2,26 \pm 0,10$ [11]
	3,5	$2,35 \pm 0,07$
	3,6	$2,42 \pm 0,10$
	3,75	$2,43 \pm 0,9$ [11]
	4,0	$2,70 \pm 0,10$
	14	$4,64 \pm 0,2$
	14,3	$3,68 \pm 0,25$ [12]
	14,9	$4,43 \pm 0,13$
	15,7	$4,25 \pm 0,13$ [11]
^{233}U	Тепловые	$2,51 \pm 0,02$
	0,08	$2,58 \pm 0,06$ [15]
	1,8	$2,71 \pm 0,04$
	4,0	$3,06 \pm 0,12$
	14,0	$4,23 \pm 0,24$ [13]
	14,0	$4,4 \pm 0,2$
	14,3	$4,20 \pm 0,30$ [12]
	14,5	$4,05 \pm 0,25$
	14,8	$4,4 \pm 0,45$ [2]
	15,0	$4,42 \pm 0,17$
^{235}U	Тепловые	$2,44 \pm 0,02$
	0,08	$2,43 \pm 0,02$
	0,25	$2,47 \pm 0,02$
	0,40	$2,38 \pm 0,018$
	0,50	$2,47 \pm 0,02$
	0,70	$2,52 \pm 0,06$
	0,746	$2,48 \pm 0,05$ [15]
	0,75	$2,45 \pm 0,01$
	1,0	$2,48 \pm 0,018$
	1,2	$2,60 \pm 0,05$

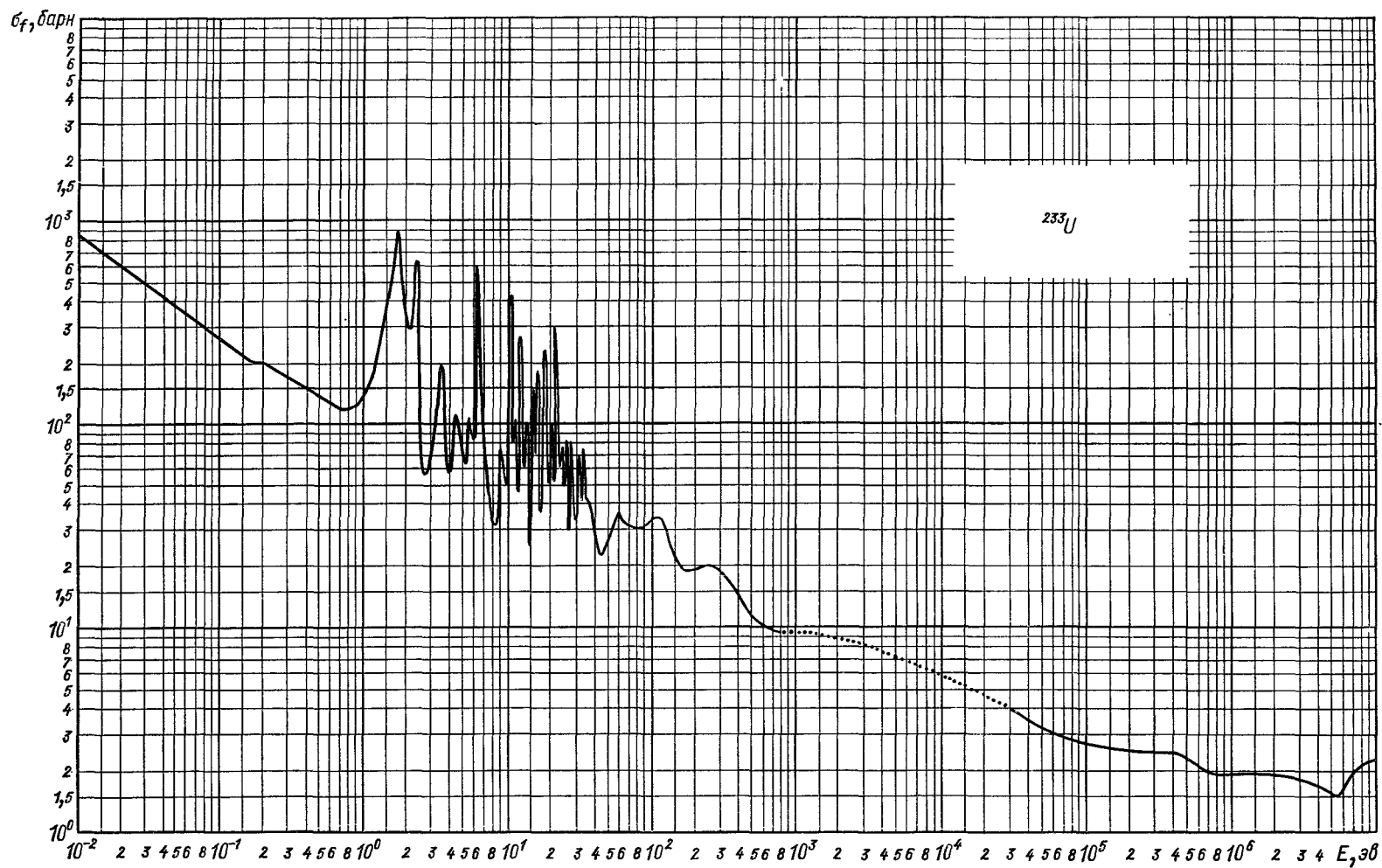


Рис. 42. 1. Зависимость сечения деления ^{233}U от энергии нейтронов [6].

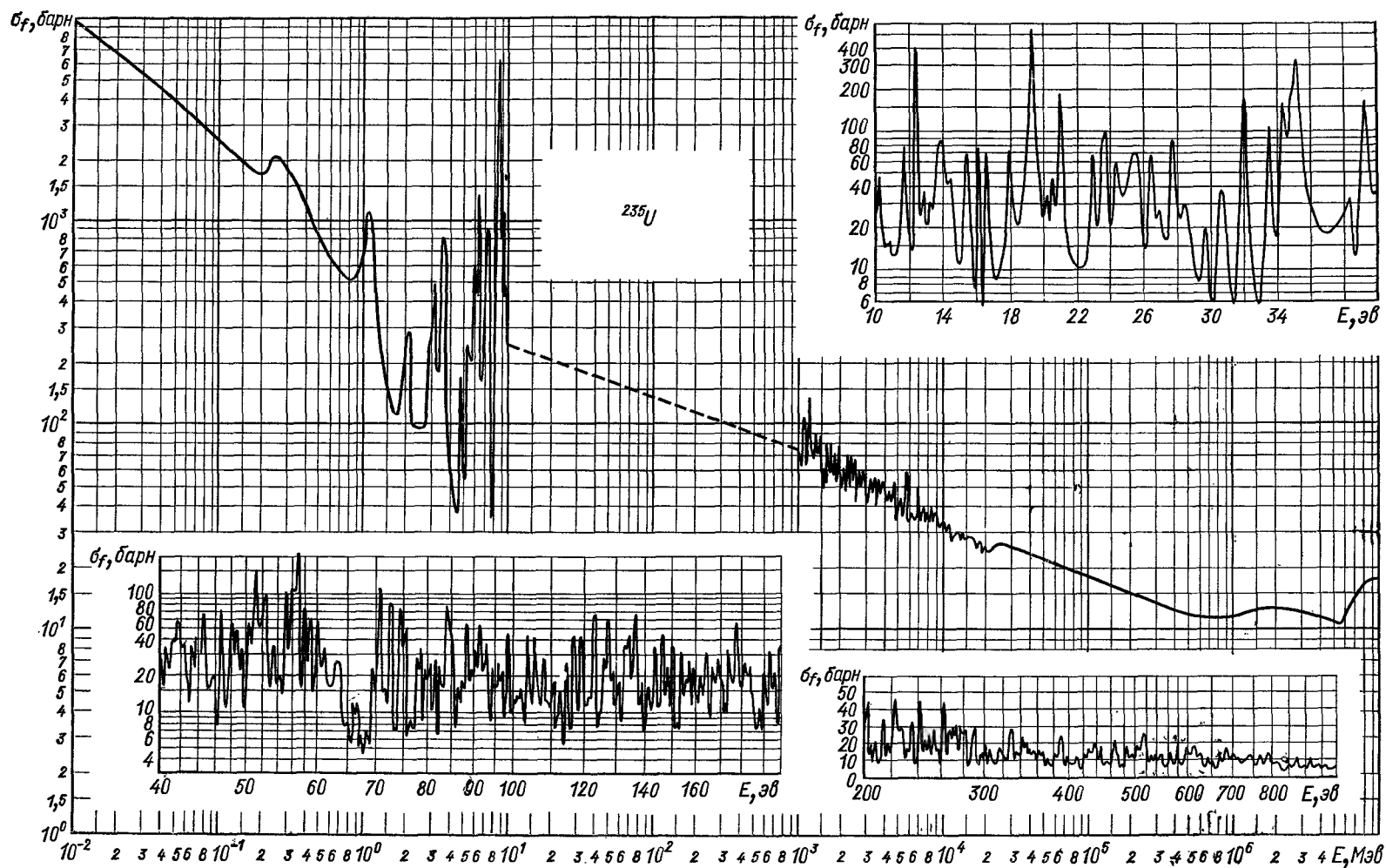


Рис. 42.2. Зависимость сечения деления ^{235}U от энергии нейтронов [7].

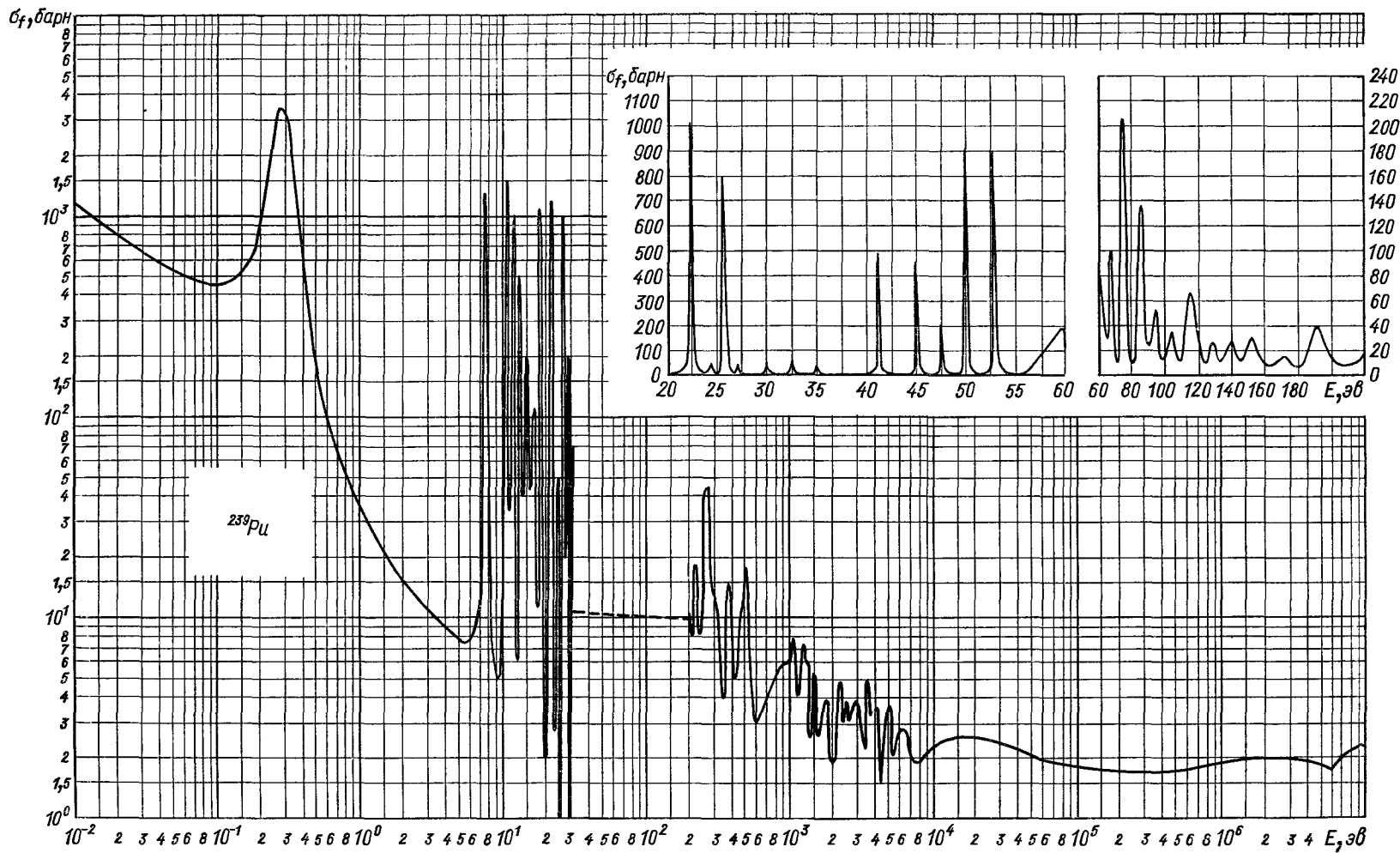


Рис. 42.3. Зависимость сечения деления ^{239}Pu от энергии нейтронов [7].

Продолжение табл. 42.4

Ядро	$E_n, \text{Мэв}$	$\bar{\nu}$
^{235}U	1,25	$2,54 \pm 0,019$ [15]
	1,50	$2,57 \pm 0,019$ [15]
	1,8	$2,74 \pm 0,05$
	1,9	$3,04 \pm 0,55$ [15]
	2,0	$2,63 \pm 0,017$
	2,5	$2,66 \pm 0,017$
	3,0	$2,72 \pm 0,02$
	4,0	$3,11 \pm 0,35$ [15]
	4,5	$3,26 \pm 0,08$
	5,0	$3,24 \pm 0,24$
	4,8	$3,20 \pm 0,25$
	14,0	$4,13 \pm 0,08$
	14,0	$4,4 \pm 0,24$
	14,1	$4,52 \pm 0,32$ [15]
	14,5	$4,25 \pm 0,25$
	14,8	$4,7 \pm 0,5$ [19]
	15,0	$4,51 \pm 0,19$
^{238}U	1,5	$2,65 \pm 0,07$
	2,3	$2,72 \pm 0,08$ [11]
	2,5	$2,72 \pm 0,10$
	3,1	$2,86 \pm 0,06$
	3,2	$2,80 \pm 0,05$
	3,6	$2,79 \pm 0,09$
	3,75	$3,02 \pm 0,10$ [11]
	4,0	$3,11 \pm 0,10$
	4,25	$3,10 \pm 0,40$ [15]
	14,0	$4,36 \pm 0,14$
	14,1	$4,13 \pm 0,25$ [15]
	14,2	$4,55 \pm 0,15$
	14,5	$4,3 \pm 0,2$
	14,9	$4,75 \pm 0,12$
^{237}Np	2,5	$2,72 \pm 0,15$
^{239}Pu	Тепловые	$2,89 \pm 0,03$
	0,08	$3,05 \pm 0,08$
	1,3	$3,08 \pm 0,05$ [15]
	1,75	$3,14 \pm 0,09$
	1,8	$3,21 \pm 0,06$
	1,8	$3,01 \pm 0,15$ [15]
	2,1	$3,21 \pm 0,12$
	4,0	$3,43 \pm 0,11$
	4,25	$3,66 \pm 0,40$ [15]
	14,0	$4,62 \pm 0,28$ [13]
	14,1	$4,85 \pm 0,50$ [15]
	14,5	$4,71 \pm 0,20$
	15,0	$4,71 \pm 0,20$
^{240}Pu	Спектр деления	$3,42 \pm 0,2$ [15]
	3,6	$3,25 \pm 0,15$ [15]
	15,0	$4,4 \pm 0,2$ [15]
^{241}Pu	Тепловые	$2,96 \pm 0,08$
	Спектр деления	$3,42 \pm 0,2$

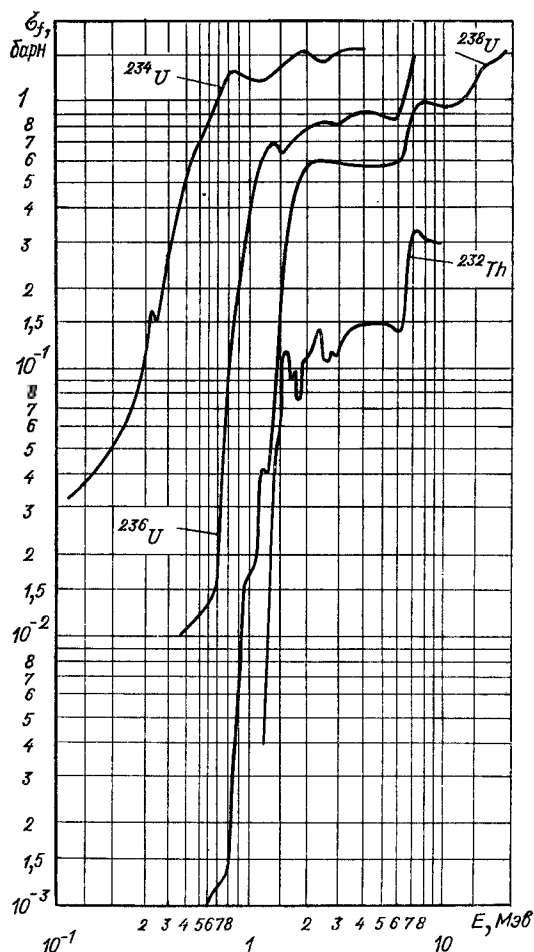


Рис. 42.4. Зависимость сечения деления ядер урана и тория от энергии нейтронов [8].

42.5. МГНОВЕННОЕ γ -ИЗЛУЧЕНИЕ, СОПРОВОЖДАЮЩЕЕ ДЕЛЕНИЕ

Энергия возбуждения осколков деления, остающаяся после эмиссии «мгновенных» нейтронов, обычно равна 3—4 Мэв/осколок. Это возбуждение осколков снимается испусканием «мгновенных» γ -квантов. Процесс излучения происходит за времена порядка 10^{-14} сек вслед за испусканием нейтронов.

Полная эффективная энергия мгновенного γ -излучения на 1 деление = 7,5 Мэв. Средняя энергия мгновенного γ -излучения = 0,9 Мэв. Среднее число γ -квантов на 1 деление $\bar{N}_\gamma = 8,3$. Среднее число γ -квантов $\bar{N}_\gamma$ обнаруживает слабую зависимость от суммарной кинетической энергии осколков деления T . Значение $\bar{N}_\gamma$ падает линейно с ростом T [2].

В табл. 42.5 представлено энергетическое распределение γ -квантов, сопровождающих деление ^{235}U .

$N(E_\gamma)$ — число γ -квантов, испускаемых при делении внутри энергетического интервала шириной 0,1 Мэв; $E_{\text{эф}} = E_\gamma N(E_\gamma)$ Мэв/деление.

Спектр мгновенных γ -квантов, сопровождающих деление ^{235}U тепловыми нейтронами [20].

$E_{\gamma}, \text{ Мэв}$	$N(E_{\gamma})$	$E_{\text{эфф}}$	$E_{\gamma}, \text{ Мэв}$	$N(E_{\gamma})$	$E_{\text{эфф}}$
0,1	0,176	0,0176	3,9	0,0126	0,0491
0,2	0,815	0,1630	4,0	0,0116	0,0464
0,3	0,697	0,2091	4,1	0,0106	0,0435
0,4	0,661	0,2644	4,2	0,00985	0,0414
0,5	0,662	0,3110	4,3	0,00908	0,0391
0,6	0,553	0,3318	4,4	0,00830	0,0365
0,7	0,474	0,3318	4,5	0,00764	0,0344
0,8	0,408	0,2464	4,6	0,00704	0,0324
0,9	0,353	0,3177	4,7	0,00649	0,0305
1,0	0,310	0,3100	4,8	0,00604	0,0290
1,1	0,272	0,2992	4,9	0,00556	0,0272
1,2	0,240	0,2880	5,0	0,00519	0,0260
1,3	0,205	0,2665	5,1	0,00470	0,0240
1,4	0,180	0,2520	5,2	0,00430	0,0224
1,5	0,158	0,2370	5,3	0,00399	0,0217
1,6	0,139	0,2224	5,4	0,00371	0,0200
1,7	0,125	0,2125	5,5	0,00341	0,0188
1,8	0,113	0,2034	5,6	0,00314	0,0176
1,9	0,102	0,1938	5,7	0,00290	0,0165
2,0	0,113	0,2260	5,8	0,00264	0,0153
2,1	0,0818	0,1718	5,9	0,00243	0,0143
2,2	0,0726	0,1597	6,0	0,00223	0,0134
2,3	0,0651	0,1497	6,1	0,00204	0,0124
2,4	0,0579	0,1390	6,2	0,00188	0,0117
2,5	0,0512	0,1280	6,3	0,00172	0,0108
2,6	0,0457	0,1188	6,4	0,00157	0,0100
2,7	0,0409	0,1104	6,5	0,00139	0,0090
2,8	0,0369	0,1033	6,6	0,00128	0,0084
2,9	0,0330	0,0957	6,7	0,00115	0,0077
3,0	0,0298	0,0894	6,8	0,00103	0,0070
3,1	0,0268	0,0831	6,9	0,000916	0,0063
3,2	0,0244	0,0781	7,0	0,000833	0,0058
3,3	0,0219	0,0723	7,1	0,000731	0,0052
3,4	0,0198	0,0673	7,2	0,000629	0,0045
3,5	0,0181	0,0634	7,3	0,000547	0,0040
3,6	0,0165	0,0594	7,4	0,000467	0,0034
3,7	0,0150	0,0555	7,5	0,000388	0,0029
3,8	0,0136	0,0517	7,6	0,000308	0,0023

Таблица 42.6

Полная энергия мгновенных γ -квантов, образующихся при делении некоторых ядер [2] E_n — энергия нейтронов, вызывающих деление;
 $E_{\text{полн}}$ — полная энергия γ -излучения.

Ядро	$E_n, \text{ Мэв}$	$\bar{N}_{\gamma}$	$E_{\gamma} \text{ полн}, \text{ Мэв}$
^{235}U	Тепловые	$7,4 \pm 0,8$	$7,2 \pm 0,8$
	2,8	—	$7,5 \pm 1,1$
	14,7	—	$7,5 \pm 1,1$
^{238}U	2,8	—	$7,5 \pm 1,1$
	14,7	—	$7,5 \pm 1,1$
^{252}Cf	Спонтанно	10,3	8,2

Суммарная энергия, выделяемая при делении ядер, складывается из:

кинетической энергии осколков деления. $T_{\text{оск}}$ энергиимгновенных γ -квантов $E_{\gamma\text{м}}$ нейтронов деления E_n β -частиц продуктов деления E_{β} γ -излучения продуктов деления $E_{\gamma\text{п.д.}}$ γ -излучения, возникающего вследствиезахвата нейтронов $E_{\gamma\text{з}}$ уносимой нейтринно E_{ν} Уносимая нейтринно энергия не выделяется в виде тепловой энергии, поэтому на один акт деления ^{235}U тепловыми нейтронами приходится $\sim 200 \text{ Мэв}$, т. е. при мощности 1 Вт происходит $3,1 \cdot 10^{10}$ деление/сек.

Таблица 42.7

Распределение энергии, выделяемой при делении

Ядро	$T_{\text{оск}}, \text{ Мэв}$		$E_{\gamma\text{м}}, \text{ Мэв}$	$E_n, \text{ Мэв}$	$E_{\beta}, \text{ Мэв}$	$E_{\gamma\text{п.д.}}, \text{ Мэв}$	$E_{\gamma\text{з}}, \text{ Мэв}$	$E_{\nu}, \text{ Мэв}$	$E_{\text{полн}}, \text{ Мэв}$
	Легкий	Тяжелый							
^{233}U	97	66	7	5,0	9	7	—	—	191
^{235}U	98	67	7,8	4,9	9	7,2	7—10	10	214
^{238}U	95,3	67,4	—	5,2	—	—	—	—	—
^{239}Pu	100	72	7	5,8	9	7	—	—	201

Средняя кинетическая энергия $T_{\text{оск}}$ деления может быть приближенно поставлена в зависимость от атомного номера Z и массового числа A делящегося изотопа [2]:

$$T_{\text{оск}} = 0,121 Z^2 A^{-1/3} \text{ Мэв.}$$

Таблица 42.8

Средняя кинетическая энергия осколков деления

Ядро	Условия реакции	$T_{\text{оск}}, \text{ Мэв}$	Литература
^{209}Bi	Нейтроны с энергией 90 Мэв	142 ± 4	[3]
^{209}At	Ионы ^{12}C с энергией 93 Мэв	142 ± 6	[5]
^{209}At	Ионы ^{12}C с энергией 123 Мэв	146 ± 6	[5]
^{213}Fr	Ионы ^{12}O с энергией 160 Мэв	150 ± 10	[5]
^{229}Th	Тепловые нейтроны	160 ± 3	[9]
^{232}Th	Нейтроны с энергией 14,9 Мэв	157 ± 4	[5]
^{232}Th	Нейтроны с энергией 45 Мэв	168 ± 6	[3]
^{232}Th	Нейтроны с энергией 90 Мэв	164 ± 4	[5]
^{233}U	Тепловые нейтроны	163 ± 2	[9]
^{235}U	» »	165 ± 2	[3]
^{235}U	Нейтроны с энергией 90 Мэв	166 ± 3	[5]
^{238}U	Нейтроны с энергией 45 Мэв	158 ± 6	[3]
^{238}U	Нейтроны с энергией 90 Мэв	160 ± 4	[3]

Ядро	Условия реакции	$T_{оск}, \text{ Мэв}$	Лите- ратура
^{238}U	Тормозное излучение $E_{\text{макс}} = 70 \text{ Мэв}$	170 ± 2	[5]
^{239}Pu	Тепловые нейтроны	172 ± 2	[9]
^{240}Pu	Спонтанное деление	172 ± 2	[3]
^{241}Pu	Тепловые нейтроны	174 ± 3	[3]
^{242}Pu	Спонтанное деление	174 ± 3	[3]
^{242}Cm	» »	180 ± 10	[9]
^{244}Cm	» »	185 ± 5	[9]
^{245}Cf	» »	183 ± 3	[9]
^{254}Fm	» »	176 ± 6	[9]

42.7. ЗАПАЗДЫВАЮЩИЕ НЕЙТРОНЫ

Запаздывающие нейтроны, испускаемые возбужденными осколками деления, в соответствии с периодами полураспада родоначальников запаздывающих нейтронов делятся на шесть групп. Периоды полураспада и выходы нейтронов для одного и того же делящегося ядра слабо зависят от энергии нейтрона, вызывающего деление.

В табл. 42.9—42.12 приняты обозначения: $T_{1/2}$ — период полураспада; $I_{\text{отн}}$ — относительная доля нейтронов в группе; $I_{\text{абс}}$ — абсолютное число нейтронов в группе на один акт деления.

Таблица 42.9

Данные по запаздывающим нейтронам при делении изотопов U и Pu тепловыми нейтронами [4]

Изотоп	Номер группы	$T_{1/2}, \text{ сек}$	$I_{\text{отн}}$	$I_{\text{абс}}$
^{233}U	1	$55,00 \pm 0,54$	0,086	$0,00057 \pm 0,00003$
	2	$20,57 \pm 0,38$	0,299	$0,00197 \pm 0,00009$
	3	$5,00 \pm 0,21$	0,252	$0,00166 \pm 0,00027$
	4	$2,13 \pm 0,20$	0,278	$0,00184 \pm 0,00016$
	5	$0,615 \pm 0,242$	0,051	$0,00034 \pm 0,00016$
	6	$0,277 \pm 0,047$	0,034	$0,00022 \pm 0,00009$
	Полный выход		1,000	$0,0036 \pm 0,0003$
^{235}U	1	$55,72 \pm 1,28$	0,033	$0,00052 \pm 0,00005$
	2	$22,72 \pm 0,71$	0,219	$0,00346 \pm 0,00018$
	3	$6,22 \pm 0,23$	0,196	$0,00310 \pm 0,00036$
	4	$2,30 \pm 0,09$	0,395	$0,00624 \pm 0,00026$
	5	$0,610 \pm 0,083$	0,115	$0,00182 \pm 0,00015$
	6	$0,230 \pm 0,025$	0,042	$0,00066 \pm 0,00008$
	Полный выход		1,000	$0,0158 \pm 0,0005$
^{239}Pu	1	$54,28 \pm 2,34$	0,035	$0,00021 \pm 0,00006$
	2	$23,04 \pm 1,67$	0,298	$0,00182 \pm 0,00023$
	3	$5,60 \pm 0,40$	0,211	$0,00129 \pm 0,00030$
	4	$2,13 \pm 0,24$	0,326	$0,00199 \pm 0,00022$
	5	$0,618 \pm 0,213$	0,086	$0,00052 \pm 0,00018$
	6	$0,257 \pm 0,045$	0,044	$0,00027 \pm 0,00010$
	Полный выход		1,000	$0,0061 \pm 0,0003$

Изотоп	Номер группы	$T_{1/2}, \text{ сек}$	$I_{\text{отн}}$	$I_{\text{абс}}$
^{241}Pu	1	$54,0 \pm 1,0$	—	$0,000154 \pm 0,00004$
	2	$23,2 \pm 0,5$	—	$0,00365 \pm 0,0001$
	3	$5,6 \pm 0,6$	—	$0,00275 \pm 0,0004$
	4	$1,97 \pm 0,1$	—	$0,00620 \pm 0,0008$
	5	$0,43 \pm 0,04$	—	$0,00290 \pm 0,0003$
	6	—	—	—
Полный выход				$0,0154 \pm 0,0015$

Таблица 42.10

Данные по запаздывающим нейтронам при делении изотопов Th, U и Pu нейтронами спектра деления [4]

Изотоп	Номер группы	$T_{1/2}, \text{ сек}$	$I_{\text{отн}}$	$I_{\text{абс}}$
^{232}Th	1	$56,03 \pm 0,95$	0,034	$0,00169 \pm 0,00012$
	2	$20,75 \pm 0,66$	0,150	$0,00744 \pm 0,00037$
	3	$5,74 \pm 0,24$	0,155	$0,00769 \pm 0,00108$
	4	$2,16 \pm 0,08$	0,446	$0,02212 \pm 0,00110$
	5	$0,571 \pm 0,042$	0,172	$0,00858 \pm 0,00073$
	6	$0,211 \pm 0,019$	0,043	$0,00213 \pm 0,00031$
	Полный выход		1,000	$0,0496 \pm 0,0020$
^{233}U	1	$55,11 \pm 1,86$	0,086	$0,00060 \pm 0,00003$
	2	$20,74 \pm 0,86$	0,274	$0,00192 \pm 0,00009$
	3	$5,30 \pm 0,19$	0,277	$0,00159 \pm 0,00025$
	4	$2,29 \pm 0,01$	0,317	$0,00222 \pm 0,00012$
	5	$0,546 \pm 0,042$	0,073	$0,00051 \pm 0,00010$
	6	$0,221 \pm 0,042$	0,023	$0,00016 \pm 0,00005$
	Полный выход		1,000	$0,00700 \pm 0,0004$
^{235}U	1	$54,51 \pm 0,94$	0,038	$0,00063 \pm 0,00005$
	2	$21,84 \pm 0,54$	0,213	$0,00351 \pm 0,00011$
	3	$6,00 \pm 0,17$	0,188	$0,00310 \pm 0,00028$
	4	$2,23 \pm 0,06$	0,407	$0,00672 \pm 0,00023$
	5	$0,496 \pm 0,029$	0,128	$0,00211 \pm 0,00015$
	6	$0,179 \pm 0,017$	0,026	$0,00043 \pm 0,00005$
	Полный выход		1,000	$0,0165 \pm 0,0005$
^{238}U	1	$52,38 \pm 1,29$	0,013	$0,00054 \pm 0,00005$
	2	$21,58 \pm 0,39$	0,137	$0,00564 \pm 0,00025$
	3	$5,00 \pm 0,19$	0,162	$0,00667 \pm 0,00027$
	4	$1,93 \pm 0,07$	0,388	$0,01599 \pm 0,00031$
	5	$0,490 \pm 0,023$	0,225	$0,00927 \pm 0,00033$
	6	$0,172 \pm 0,009$	0,075	$0,00309 \pm 0,00024$
	Полный выход		1,000	$0,0412 \pm 0,0017$

Изотоп	Номер группы	$T_{1/2}$, сек	$I_{отн}$	$I_{абс}$
^{235}Pu	1	$53,75 \pm 0,95$	0,038	$0,00024 \pm 0,00002$
	2	$22,29 \pm 0,36$	0,280	$0,00176 \pm 0,00002$
	3	$5,19 \pm 0,12$	0,216	$0,00136 \pm 0,00013$
	4	$2,09 \pm 0,08$	0,328	$0,00207 \pm 0,00012$
	5	$0,549 \pm 0,049$	0,103	$0,00065 \pm 0,00007$
	6	$0,216 \pm 0,017$	0,035	$0,00022 \pm 0,00003$
Полный выход			1,000	$0,0063 \pm 0,0003$
^{240}Pu	1	$53,56 \pm 1,21$	0,028	$0,00022 \pm 0,00003$
	2	$22,14 \pm 0,38$	0,273	$0,00238 \pm 0,00016$
	3	$5,14 \pm 0,42$	0,199	$0,00162 \pm 0,00044$
	4	$2,08 \pm 0,19$	0,350	$0,00315 \pm 0,00027$
	5	$0,511 \pm 0,077$	0,128	$0,00119 \pm 0,00018$
	6	$0,172 \pm 0,033$	0,029	$0,00024 \pm 0,00005$
Полный выход			1,000	$0,0088 \pm 0,0006$

Таблица 42.11

Средние энергии $E_{ср}$ групп запаздывающих нейтронов для ^{235}U

Номер группы	$T_{1/2}$, сек	$E_{ср}$, кэв	Литература
1	54	250 ± 20	[16]
2	22	460 ± 10	[16]
3	5,9	405 ± 20	[16]
4	2,2	450 ± 20	[16]
5	0,46	420 ± 60	[6]

Таблица 42.12

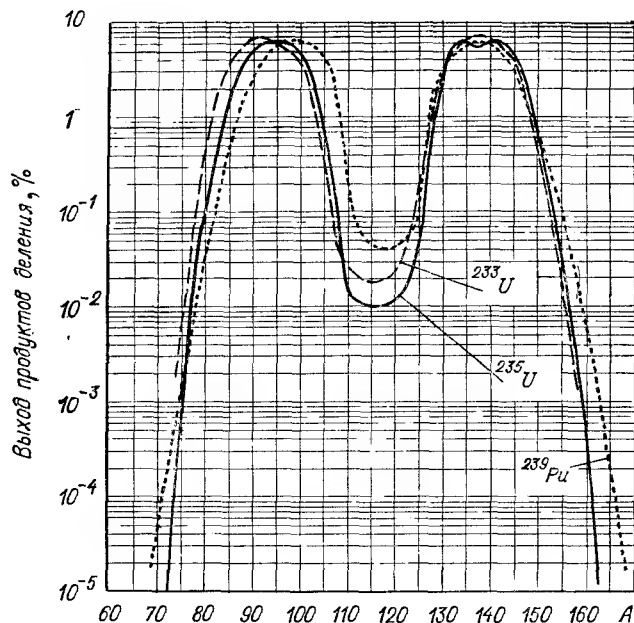
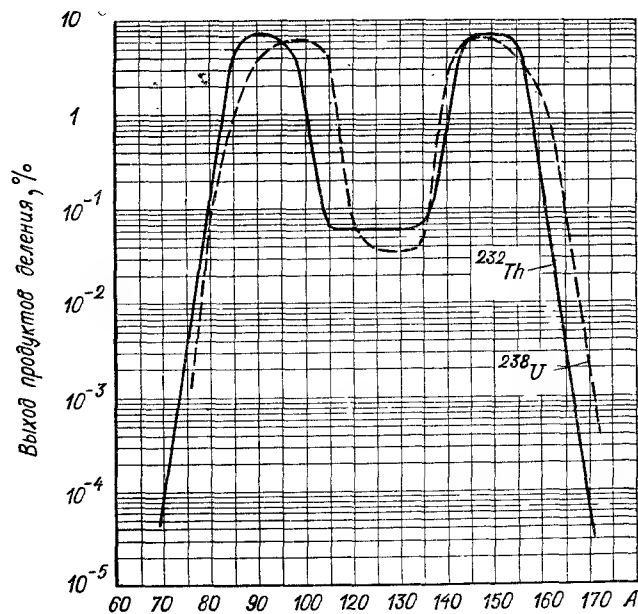
Родоначальники запаздывающих нейтронов [16—18]

Согласно терминологии, предлагаемой в работе [17], родоначальниками запаздывающих нейтронов называются первые β -активные осколки деления, а продукты распада осколков называются излучателями запаздывающих нейтронов.

Номер группы	$T_{1/2}$, сек	Наиболее вероятные родоначальники
1	55	^{87}Br (54 сек) + ^{142}Cs (~ 1 мин)
2	22	^{137}I (24,2 сек) + ^{88}Br (15,5 сек) + ^{136}Te (20 сек)
3	6	^{138}I (5,9 сек) + ^{89}Br (3,9 сек)
4	2,2	^{139}I (2,7 сек) + ^{94}Kr (1,4 сек) + ^{140}Cs
5	0,5	^{140}I
6	0,18	^{93}Br + ^{145}Cs

42.8. ПРОДУКТЫ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

Выходы продуктов деления. На рис. 42.5 и 42.6 приведены выходы (в процентах при нормировке всей кривой на 200%) продуктов деления, образующихся при делении ^{233}U , ^{235}U и ^{239}Pu тепловыми нейтронами, а также ^{232}Th

Рис. 42.5. Зависимость выходов продуктов деления ^{233}U , ^{235}U и ^{239}Pu под действием тепловых нейтронов от массового числа A [4, 22]. Для ^{233}U и ^{239}Pu приведены независимые выходы. Для ^{235}U дан полный выход.Рис. 42.6. Независимые выходы продуктов деления ^{232}Th и ^{238}U под действием нейтронов спектра деления как функция массового числа A [22].

и ^{238}U при делении нейтронами спектра деления. Независимым выходом называют непосредственный выход осколков при делении ядра. Полный выход какого-либо изотопа складывается из независимого выхода и той

доли, которая образуется в результате цепочки β -распадов.

Излучение продуктов деления. В создании β - и γ -излучения продуктов деления участвуют более 100 радиоактивных изотопов, поэтому часто рассматривают совокупное β - или γ -излучение в момент времени t после деления, усредненное по многим актам деления.

Зависимость интенсивности β - и γ -излучений продуктов деления $[A_\beta(t) \text{ и } A_\gamma(t)]$ от времени может быть представлена приближенно выражениями:

$$A_\beta(t) \approx 1,4 t^{-1,2} \text{ Мэв} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{деление}^{-1} [22];$$

$$A_\gamma(t) \approx 2 t^{-1,2} \text{ Мэв} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{деление}^{-1} [21],$$

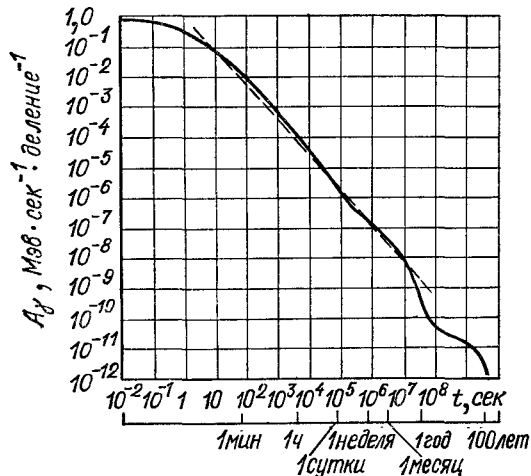


Рис. 42.7. Зависимость мощности γ -излучения A_γ продуктов деления ^{235}U от времени [21]. Пунктиром проведена кривая $2t^{-1,2}$.

которые справедливы для интервала $10 \text{ сек} < t < 100$ суток с погрешностью $\pm 20\%$.

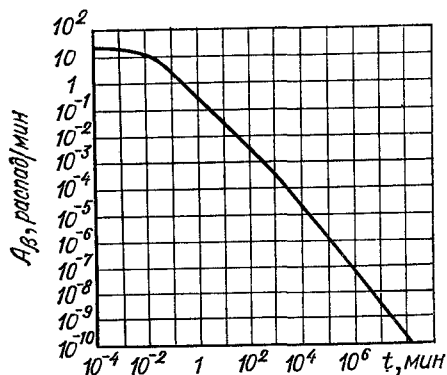


Рис. 42.8. Зависимость полной β -активности A_β продуктов деления ^{235}U от времени. Кривая получена усреднением экспериментальных и теоретических данных, собранных в работе [22].

42.9. ФОТОДЕЛЕНИЕ И ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Процесс деления ядер становится возможным, если энергия возбуждения ядра U превышает пороговую энергию возбуждения составного ядра (порог деления) U_A . При делении ядер под действием γ -квантов величина порога совпадает с минимальной (пороговой) энергией E_γ^* γ -кванта, еще способного вызвать реакцию деления. В случае деления ядер под действием нейтронов $E_n^* = U_A - B_n$, поэтому значения E_n^* могут быть и отрицательными.

Таблица 42.13

Мощность источников γ -излучения продуктов деления из активной зоны реактора, работавшего в течение времени T [20]

Мощность γ -источников (Мэв/сек) отнесена к 1 Вт мощности реактора.

Время после остановки, сек	Кампания реактора T					
	1 ч	1 сутки	1 неделя	1 месяц	3 месяца	6 месяцев
10^2	$4,82 \cdot 10^{10}$	$7,20 \cdot 10^{10}$	$7,91 \cdot 10^{10}$	$8,29 \cdot 10^{10}$	$8,50 \cdot 10^{10}$	$8,61 \cdot 10^{10}$
10^3	$1,83 \cdot 10^{10}$	$3,99 \cdot 10^{10}$	$4,70 \cdot 10^{10}$	$5,07 \cdot 10^{10}$	$5,28 \cdot 10^{10}$	$5,39 \cdot 10^{10}$
10^4	$2,54 \cdot 10^9$	$1,43 \cdot 10^{10}$	$2,09 \cdot 10^{10}$	$2,46 \cdot 10^{10}$	$2,67 \cdot 10^{10}$	$2,78 \cdot 10^{10}$
10^5	$1,65 \cdot 10^8$	$2,62 \cdot 10^9$	$6,89 \cdot 10^9$	$1,03 \cdot 10^{10}$	$1,23 \cdot 10^{10}$	$1,34 \cdot 10^{10}$
$2 \cdot 10^5$	$6,51 \cdot 10^7$	$1,24 \cdot 10^9$	$4,39 \cdot 10^9$	$7,47 \cdot 10^9$	$9,44 \cdot 10^9$	$1,05 \cdot 10^{10}$
$5 \cdot 10^5$	$2,16 \cdot 10^7$	$4,77 \cdot 10^8$	$2,28 \cdot 10^9$	$4,70 \cdot 10^9$	$6,51 \cdot 10^9$	$7,55 \cdot 10^9$
10^6	$9,81 \cdot 10^6$	$2,24 \cdot 10^8$	$1,22 \cdot 10^9$	$3,00 \cdot 10^9$	$4,60 \cdot 10^9$	$5,57 \cdot 10^9$
$2 \cdot 10^6$	$4,14 \cdot 10^6$	$9,70 \cdot 10^7$	$5,92 \cdot 10^8$	$1,74 \cdot 10^9$	$3,04 \cdot 10^9$	$3,90 \cdot 10^9$
$5 \cdot 10^6$	$1,31 \cdot 10^6$	$3,12 \cdot 10^7$	$2,05 \cdot 10^8$	$7,27 \cdot 10^8$	$1,56 \cdot 10^9$	$2,18 \cdot 10^9$
10^7	$5,81 \cdot 10^5$	$1,39 \cdot 10^7$	$9,42 \cdot 10^7$	$3,61 \cdot 10^8$	$8,34 \cdot 10^8$	$1,18 \cdot 10^9$
$2 \cdot 10^7$	$1,88 \cdot 10^5$	$4,49 \cdot 10^6$	$3,05 \cdot 10^7$	$1,17 \cdot 10^8$	$2,70 \cdot 10^8$	$3,85 \cdot 10^8$
$5 \cdot 10^7$	$1,02 \cdot 10^4$	$2,45 \cdot 10^6$	$1,69 \cdot 10^6$	$6,81 \cdot 10^6$	$1,80 \cdot 10^6$	$3,10 \cdot 10^7$
10^8	$3,55 \cdot 10^3$	$8,52 \cdot 10^4$	$5,96 \cdot 10^5$	$2,54 \cdot 10^6$	$7,51 \cdot 10^6$	$1,48 \cdot 10^7$
$2 \cdot 10^8$	$2,69 \cdot 10^3$	$6,47 \cdot 10^4$	$4,53 \cdot 10^5$	$1,94 \cdot 10^6$	$5,80 \cdot 10^6$	$1,16 \cdot 10^7$
$5 \cdot 10^8$	$2,10 \cdot 10^3$	$5,04 \cdot 10^4$	$3,53 \cdot 10^5$	$1,51 \cdot 10^6$	$4,52 \cdot 10^6$	$9,04 \cdot 10^6$
10^9	$1,44 \cdot 10^3$	$3,45 \cdot 10^4$	$2,42 \cdot 10^5$	$1,03 \cdot 10^6$	$3,10 \cdot 10^6$	$6,19 \cdot 10^6$
$2 \cdot 10^9$	$6,75 \cdot 10^2$	$1,62 \cdot 10^4$	$1,13 \cdot 10^5$	$4,85 \cdot 10^5$	$1,45 \cdot 10^6$	$2,91 \cdot 10^6$
10^{10}	1,79	4,32	$3,02 \cdot 10^2$	$1,29 \cdot 10^3$	$3,88 \cdot 10^3$	$7,76 \cdot 10^3$

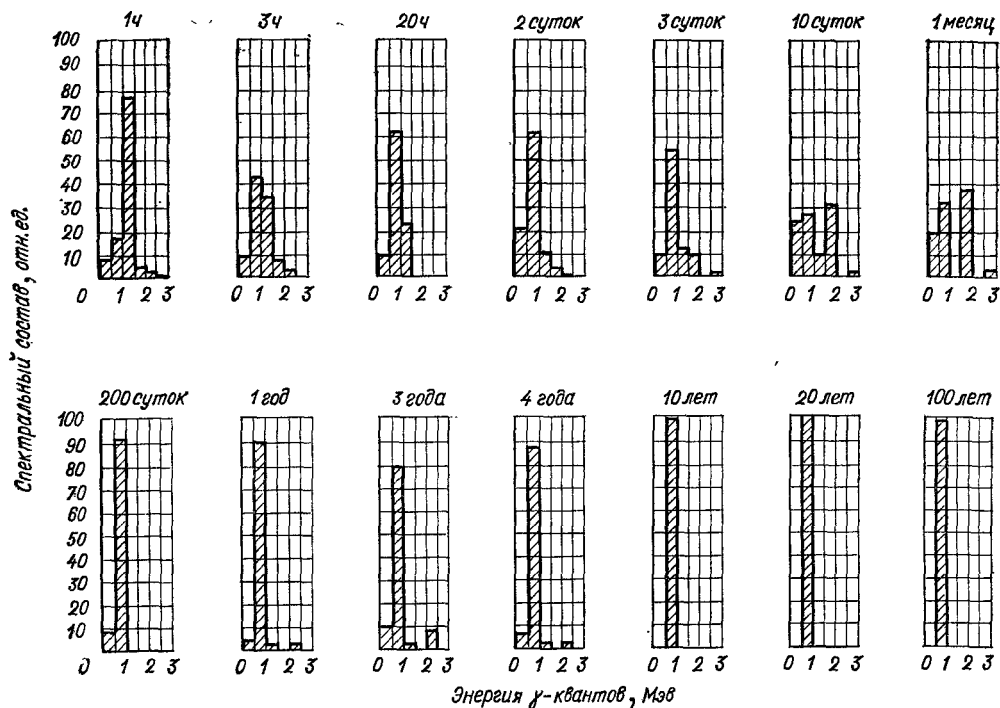


Рис. 42.9. Зависимость спектрального состава γ -излучения продуктов деления ^{235}U от времени [21].

Отметим, что вследствие туннельного эффекта ядро может разделиться и при $U < U_A$, поэтому значения E_n^* и U_A принципиально не могут быть точно определены в опыте.

Таблица 42.14

Пороги деления некоторых ядер [2]

Составное ядро	Изученная реакция	U_A , Мэв	B_n , Мэв	E_γ^* или E_n^* , Мэв
^{232}Th	(γ, f)	5,8	—	5,8
^{233}Th	(n, f)	6,64	5,09	1,55
^{232}Pa	(n, f)	6,50	5,65	0,85
^{233}U	(γ, f)	5,6	—	5,6
^{234}U	(d, pf)	5,4	6,77	—1,4
^{235}U	(γ, f)	6,0	—	6,0
^{235}U	(n, f)	5,86	5,25	0,61
^{236}U	(d, pf)	5,9	6,44	—0,5
^{237}U	(n, f)	6,47	5,32	1,15
^{238}U	(γ, f)	5,75	—	5,75
^{239}U	(d, pf)	6,28	4,78	1,50
^{239}U	(n, f)	6,28	4,78	1,50
^{237}Np	(γ, f)	5,7	—	5,7
^{238}Np	(n, f)	6,04	5,42	0,62
^{239}Pu	(n, f)	6	—	6
^{240}Pu	(d, pf)	4,9	6,43	—1,5
^{241}Pu	(n, f)	6,10	5,44	0,66
^{241}Am	(γ, f)	6,0	—	6,0
^{242}Am	(n, f)	6,48	5,55	0,93

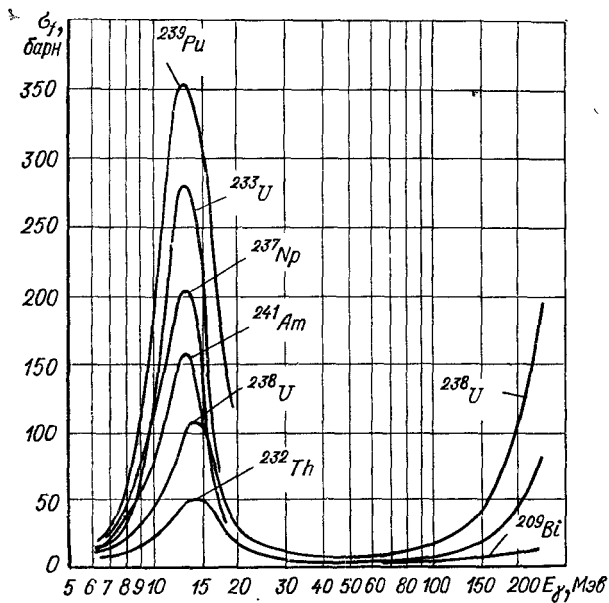


Рис. 42.10. Зависимость сечения фотоделения некоторых ядер от энергии фотонов [2].

Таблица 42.15

Сечение деления σ_f (барн) некоторых ядер-мишеней под действием протонов*

Энергия протонов, Мэв	^{16}O	^{181}Ta	^{185}Re , ^{187}Re	^{197}Au	^{209}Bi	^{232}Th	^{235}U	^{238}U
100	—	—	—	—	—	$0,87 \pm 0,15$	$1,5 \pm 0,5$	$1,35 \pm 0,2$
200	—	—	—	$0,35 \pm 0,05$	$1,5 \pm 0,15$	$0,83 \pm 0,1$	$1,3 \pm 0,1$	$1,3 \pm 0,1$
300	—	—	—	$0,49 \pm 0,7$	$2,0 \pm 0,15$	$0,79 \pm 0,1$	$1,3 \pm 0,1$	$1,37 \pm 0,1$
450 [26]	0,002	0,005	0,019	0,061	0,21	0,67	—	—

* Значения получены путем пересчета с графиков, приведенных в работе [25].

Таблица 42.16

Зависимость сечения деления ^{238}U от энергии E_α бомбардирующих α -частиц [24]

E_α , Мэв	σ_f , барн	E_α , Мэв	σ_f , барн
23,5	0,184	35,3	1,27
26,2	0,4	41,0	1,43
30,7	1,06	44,3	1,99

Таблица 42.18

Характеристики деления различных ядер под действием мезонов [2]

Ядро-мишень	Мезоны	Энергия частицы, Мэв	Вероятность деления $\frac{\sigma_f}{\sigma_{\text{полн}}}$	Сечение деления σ_f , барн
^{209}Bi	π^-	Медленные	0,02	—
Hg	π^-	122	0,005	—
^{238}U	μ^-	Медленные	$0,07 \pm 0,15$	—
^{238}U	π^+	280	—	$1,0 \pm 0,2$
^{238}U	π^-	Медленные	$0,18 - 0,87$	—
W	π^-	»	0,002	—

Таблица 42.17

Зависимость сечения деления ^{235}U от энергии E_α бомбардирующих α -частиц [23, 24]

E_α , Мэв	σ_f , барн	E_α , Мэв	σ_f , барн
19,7	0,0018	32,8	0,78
20,5	0,010	33,8	1,03
21,9	0,058	34,1	1,29
23,1	0,087	37,1	1,49
25,9	0,31	39,9	1,38
26,8	0,42	42,8	1,76
28,2	0,580	45	1,84

Таблица 42.19

Сечения деления (мбарн) различных ядер под действием ионов ^{14}N [27, 28]

Ядро-мишень	Энергия ионов, Мэв				
	70	80	90	100	110
^{197}Au	—	220 ± 50	500 ± 100	1000 ± 180	1200 ± 150
^{209}Bi	64 ± 20	550 ± 150	1300 ± 300	1750 ± 150	2150 ± 200
Re	—	38 ± 8	250 ± 60	410 ± 80	—
^{235}U	—	65 ± 20	220 ± 30	630 ± 70	—
^{238}U	6,5	130 ± 30	480 ± 100	1300 ± 250	1500

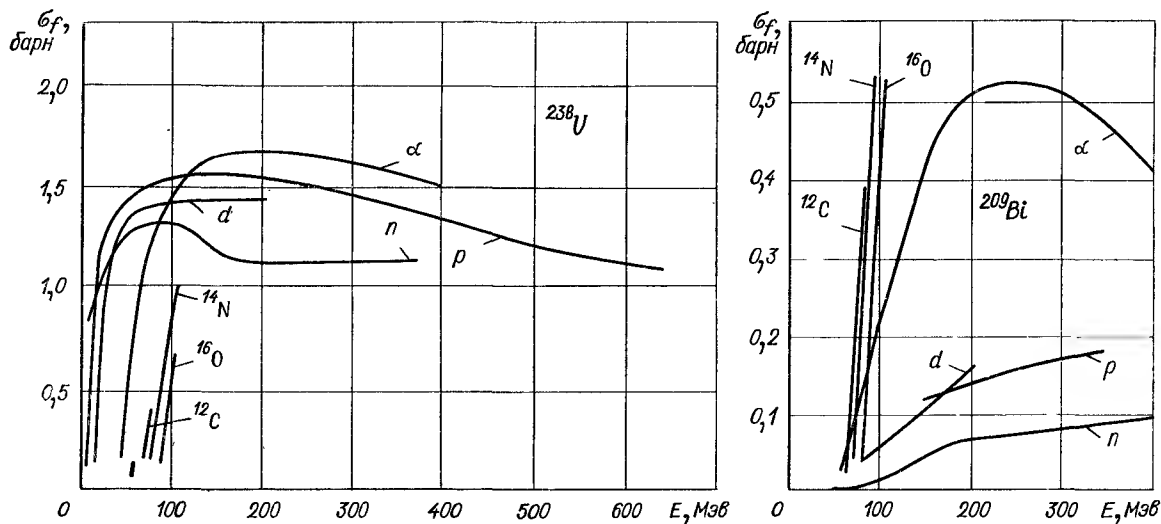


Рис. 42.11. Зависимость сечения деления ядер ^{238}U и ^{209}Bi от энергии различных бомбардирующих частиц [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Lederer C. M., Hollander J. M., Perlman I. Table of isotopes. ed. New York — London — Sidney. John Wiley and Sons, Inc., 1967.
- Краут А. Достижения физики деления ядер.— В кн.: «Физика деления ядер». Пер. с англ. М., Госатомиздат, 1963.
- Халперн И. Деление ядер. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1962.
- Гордеев И. В. и др. Ядерно-физические константы. М., Госатомиздат, 1963.
- Ядерные реакции. Под ред. П. М. Эндта, М. Демера, П. Б. Смитта. Пер. с англ. Т. 1, 2. М., Атомиздат, 1962, 1964.
- Юз Д., Шварц Р. Атлас нейтронных сечений. М., Атомиздат, 1959.
- Schmidt J. J. Neutron cross section for fast reactor materials. Karlsruhe, 1962.
- Вейнберг А., Вигнер Е. Физическая теория ядерных реакторов. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
- Террелл Дж. Распределение числа нейтронов деления. Спектры нейтронов деления.— В кн.: «Физика деления ядер». Пер. с англ. М., Госатомиздат, 1963, с. 351, 365.
- Большов В. И. и др. В кн.: «Физика деления атомных ядер». М., Госатомиздат, 1962, с. 127.
- Кузьминов Б. Д. В кн.: «Нейтронная физика». М., Госатомиздат, 1961, с. 241, 246.
- Васильев Ю. А. В кн.: «Физика деления атомных ядер». М., Госатомиздат, 1952, с. 121.
- Флэров Н. Н., Талызин В. Н. «Атомная энергия», 1961, т. 10, вып. 1, с. 68.
- Кёртис Л. Введение в нейтронную физику. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1965.
- Личмен Р. Б. В кн.: «Труды Второй междунар. конф. по мирному использованию атомной энергии. Докл. иностр. ученых», т. 2, М., Атомиздат, 1959, с. 282.
- Киппин Г. Р. Запавдывающие нейтроны.— В кн. «Успехи в области ядерной энергии». Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1958, с. 216.
- Киппин Г. Р. «Атомная энергия», 1958, т. 4, вып. 2, с. 250.
- Паппас А. В кн.: «Труды Второй междунар. конф. по мирному использованию атомной энергии. Докл. иностр. ученых», т. 2. М., Атомиздат, 1959, с. 308.
- Протопопов А. Н., Блинов М. В. «Атомная энергия», 1958, т. 1, с. 71.
- Бродер Д. Л., Попков К. К., Рубанов С. М. Малогабаритная защита реакторов. М., Атомиздат, 1967.
- Лейпунский О. П. Гамма-излучение атомного взрыва. М., Атомиздат, 1959.
- Физика ядерных реакторов. Пер. с англ. Под ред. И. А. Стенбока. М., Атомиздат, 1964.
- Gunnink R., Cobble J. W. «Phys. Rev.», 1959, v. 115, p. 1247.
- Vandenbosch R. e. a. «Phys. Rev.». 1958, v. 111, p. 1358.
- Jungerman J. A. «Phys. Rev.», 1956, v. 101, с. 807.
- Kruger P., Sugarman N. «Phys. Rev.», 1955, v. 99, p. 1459.
- Поликанов С. М., Друин В. А. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1959, т. 36, с. 744.
- Друин В. А., Поликанов С. М., Флеров Г. Н. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1957, т. 32, с. 1298.

ГЛАВА 43

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

43.1. ФОРМУЛА ГАМОВА

Термоядерными реакциями называют реакции слияния легких ядер, сопровождающиеся выделением энергии. Сечения σ термоядерных реакций при малых значениях

энергии ($E \ll 200 \text{ кэВ}$) участвующих в реакции частиц могут быть оценены по формуле Гамова:

$$\sigma(E) = (A/E) \exp(-B/\sqrt{E}). \quad (43.1)$$

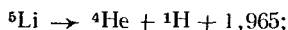
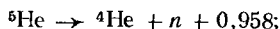
Здесь σ — сечение реакции, см^2 ; E — энергия бомбардирующей частицы в лабораторной системе координат; av ; A и B — константы Гамова. Константа A имеет размерность энергии, а размерность константы B : $[B] = [E^{1/2}]$. Константы Гамова обычно вычисляются для каждой конкретной реакции из имеющейся экспериментальной зависимости сечения от энергии. Формула Гамова позволяет произвести экстраполяцию экспериментальной зависимости $\sigma(E)$ в область энергий, для которых отсутствуют экспериментальные данные. Для грубой оценки может быть использовано теоретически вычисленное значение произведения

$$BE^{-0.5} = 2\pi Z_1 Z_2 e^2 / (h\nu),$$

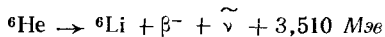
где Z_1 и Z_2 — заряды реагирующих частиц; v — скорость бомбардирующей частицы в лабораторной системе координат; e — заряд электрона и h — постоянная Планка.

43.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ВЫХОДЫ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Ниже приведены энергетические выходы термоядерных реакций, рассчитанные по массам изотопов [1—3]. Все энергетические выходы даны в мегаэлектронвольтах. В общем балансе энергий необходимо учитывать энергию, выделяющуюся при распаде некоторых короткоживущих продуктов реакций, таких, как ${}^6\text{He}$, ${}^5\text{Li}$, ${}^8\text{Be}$ (имеющих время жизни $\sim 10^{-16}$ сек);

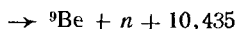
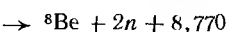
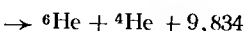
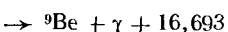
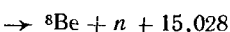
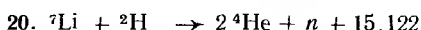
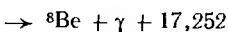
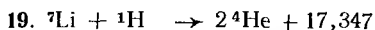
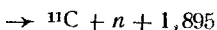
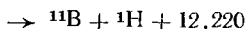
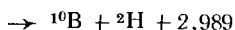
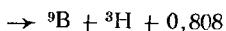
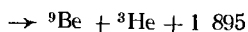
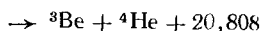
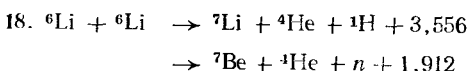
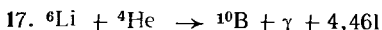
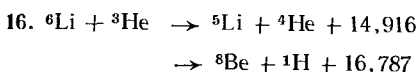
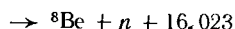
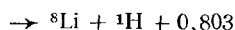
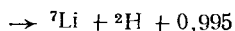
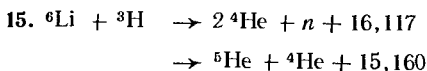
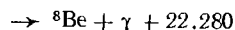
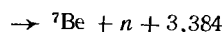
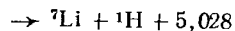
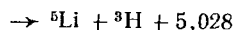
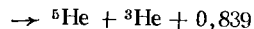
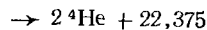
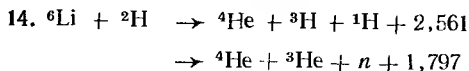
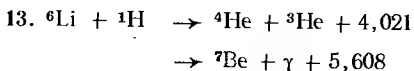
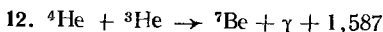
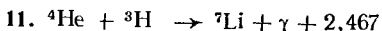
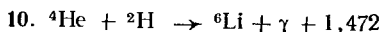
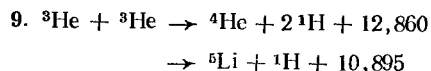
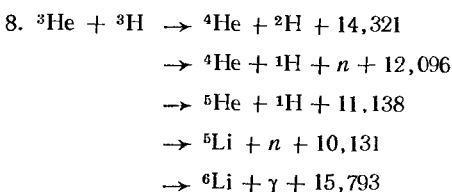
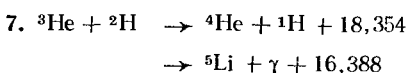
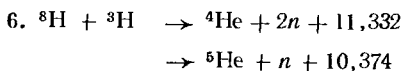
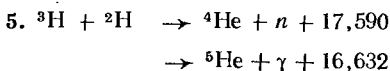
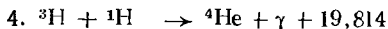
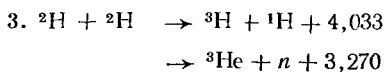
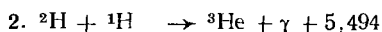
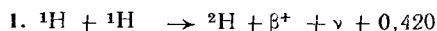


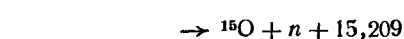
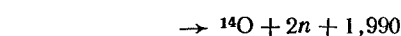
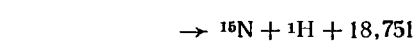
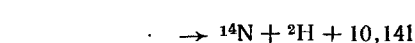
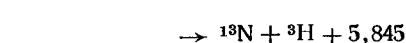
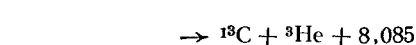
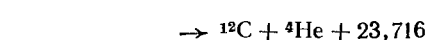
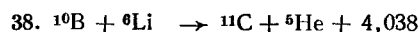
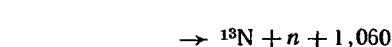
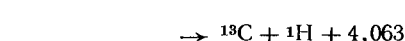
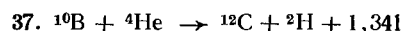
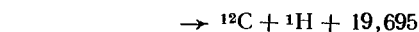
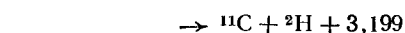
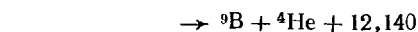
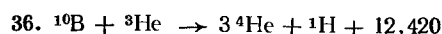
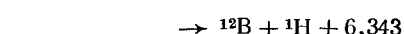
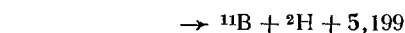
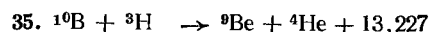
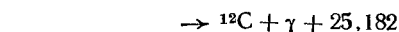
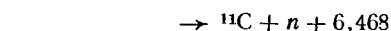
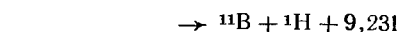
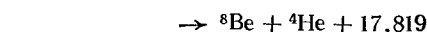
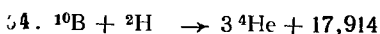
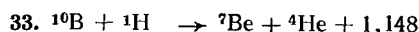
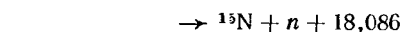
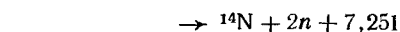
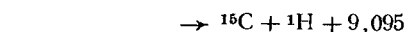
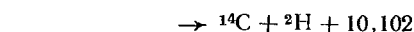
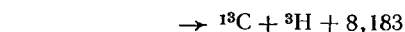
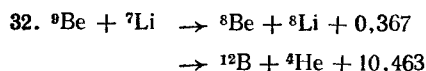
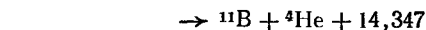
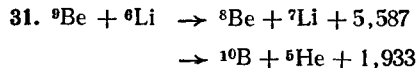
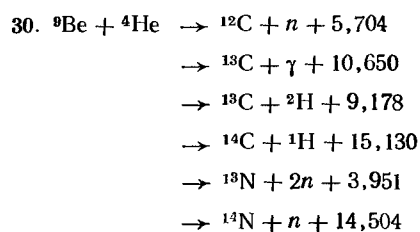
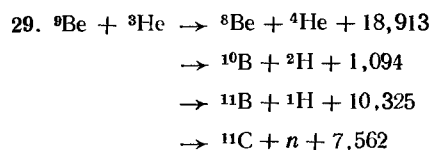
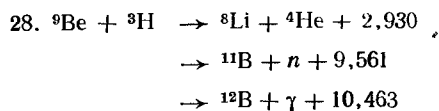
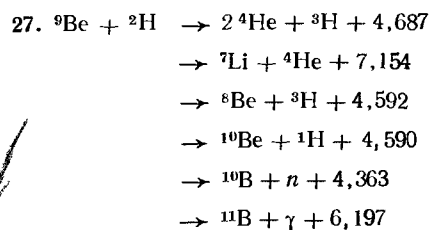
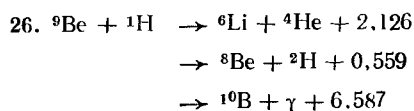
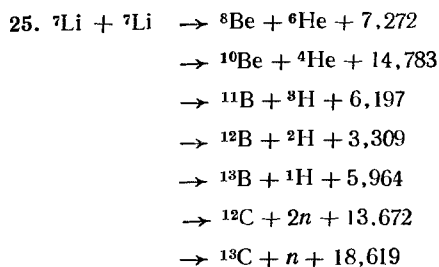
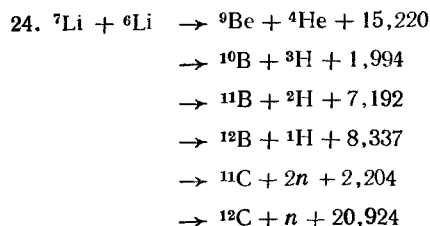
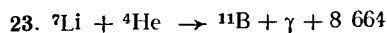
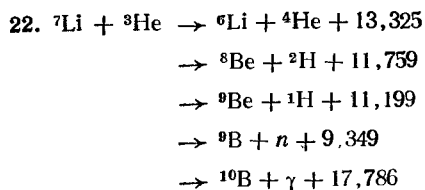
а также энергию, выделяющуюся при распаде ${}^6\text{He}$:

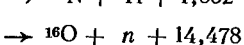
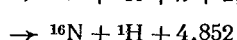
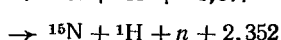
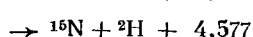
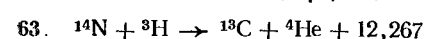
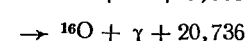
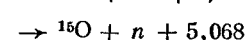
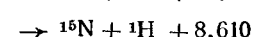
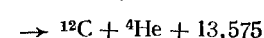
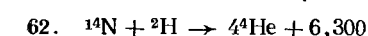
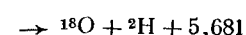
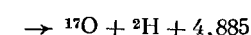
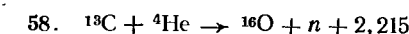
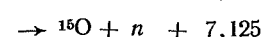
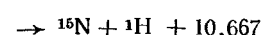
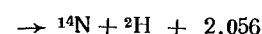
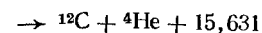
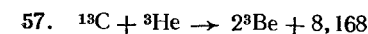
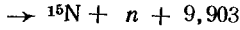
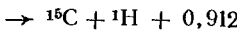
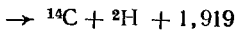
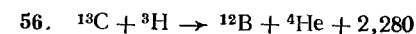
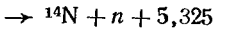
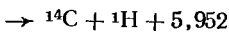
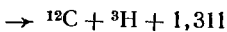
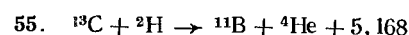
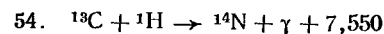
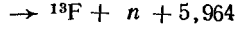
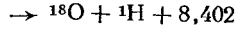
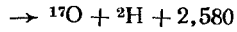
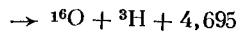
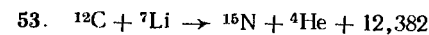
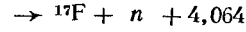
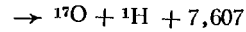
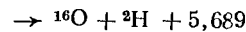
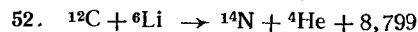
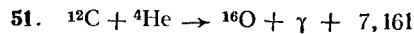
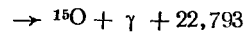
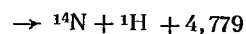
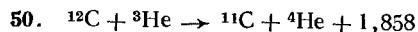
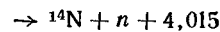
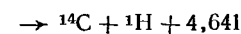
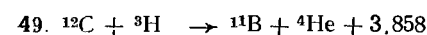
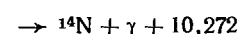
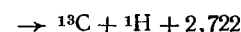
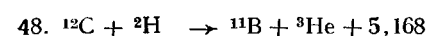
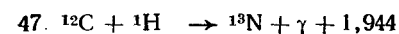
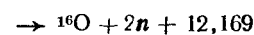
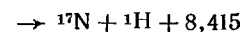
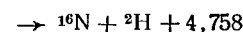
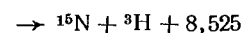
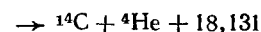
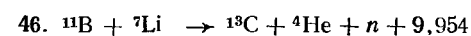
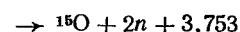
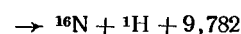
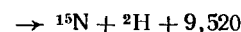
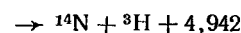
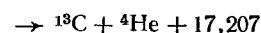
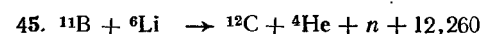
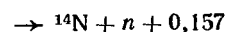
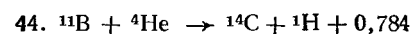
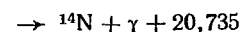
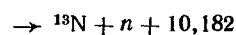
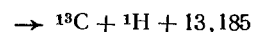
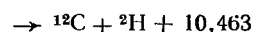
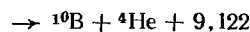
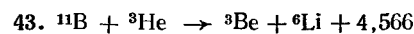
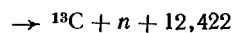
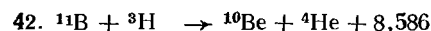
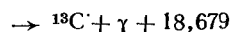
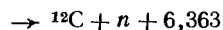
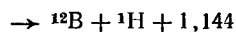
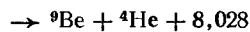
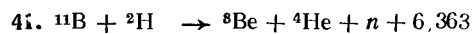
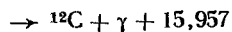
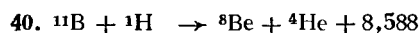
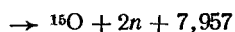
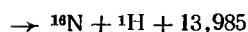
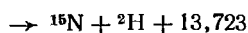
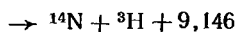
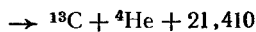
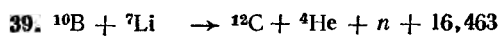


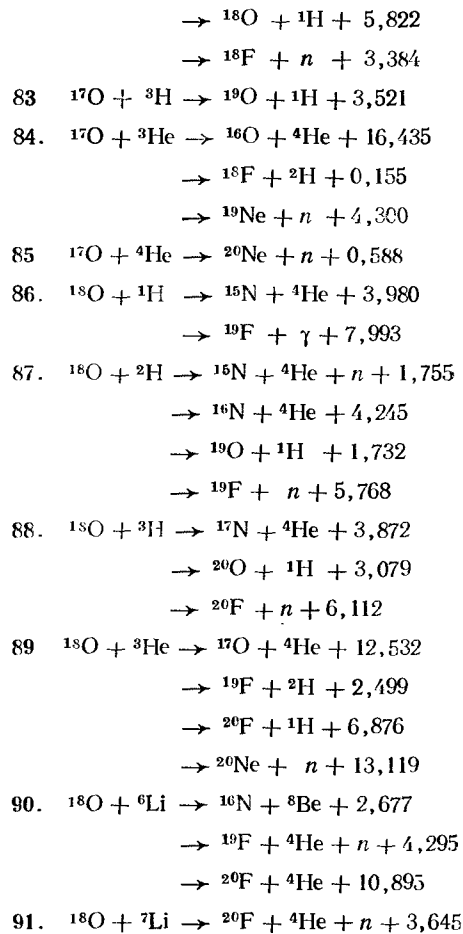
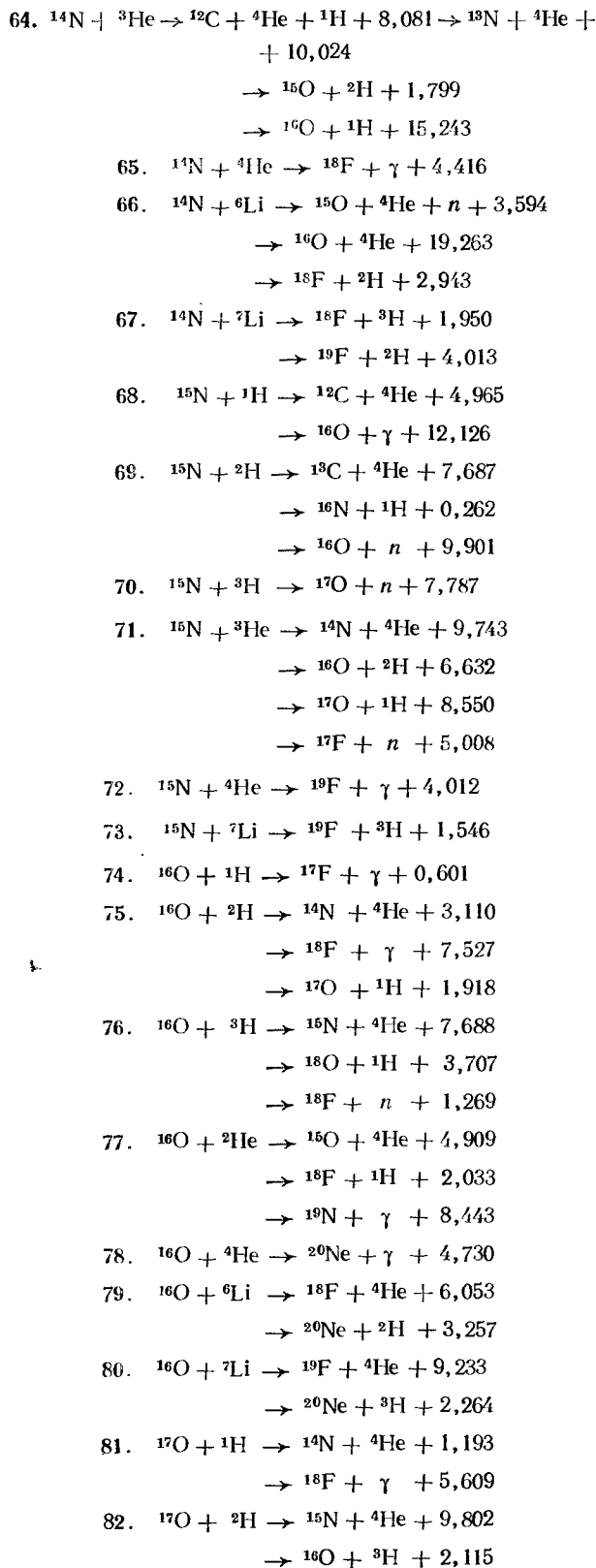
с периодом полураспада $T_{1/2} = 0,802 \text{ сек.}$

Принятые обозначения: β^- — электрон; β^+ — позитрон; ν — нейтрино; $\tilde{\nu}$ — антинейтрино.









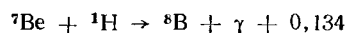
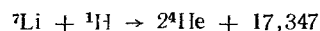
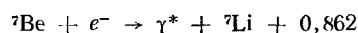
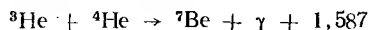
43.3. ЗВЕЗДНЫЕ ЦИКЛЫ

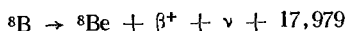
Предполагается, что источником энергии Солнца и звезд являются термоядерные реакции, происходящие в их недрах. В результате этих реакций происходит превращение легких элементов в более тяжелые, например синтез ${}^4\text{He}$ из ${}^1\text{H}$. Синтез более тяжелых элементов обычно осуществляется путем последовательной цепи нескольких термоядерных реакций. Этот комплекс реакций носит название звездного цикла.

Ниже приведены реакции, входящие в цикл и их энергосодержание [9, 10]. Под заголовком цикла указаны исходные вещества и конечные продукты, образующиеся в цикле (элементарные частицы и фотоны опущены), а также суммарная выделяемая энергия.

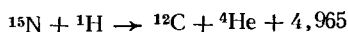
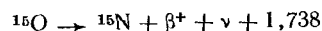
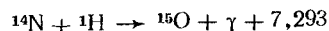
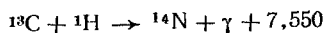
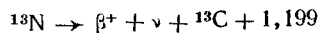
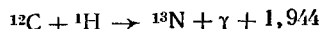
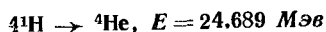
Протонный цикл (*pp*-цикл)

$${}^{16}\text{H} \rightarrow {}^4\text{He}, E = 100,794 \text{ Мэв}$$

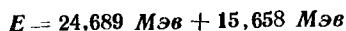




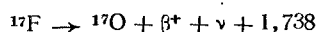
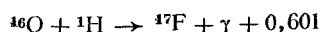
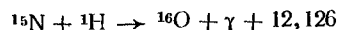
Углеродно-азотный цикл (C—N-цикл)



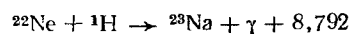
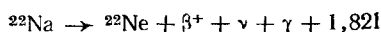
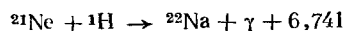
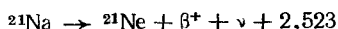
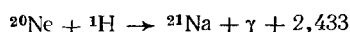
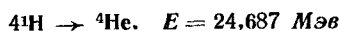
Двойной углеродно-азотно-кислородный цикл



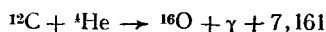
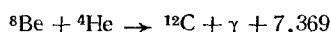
C—N-цикл +



Неоново-натриевый цикл (Ne—Na-цикл)



Гелиевый цикл (He-цикл)



43.4. ЭФФЕКТИВНЫЕ СЕЧЕНИЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

На рис. 43.1—43.7 приведены экспериментальные зависимости полных сечений термоядерных реакций от энергии бомбардирующей частицы. Для энергий, меньших 200 кэв, можно получить приближенное значение сечения реакции, обработав экспериментальные данные по формуле Гамова (43.1) и экстраполировав полученные кривые в область малых энергий. В тех случаях, когда авторы не конкретизировали продукты реакции, а измеряли суммарное сечение для всех возможных каналов реакции, в подрисуночной подписи не указаны продукты реакции, например $\text{Li}(t, n)$.

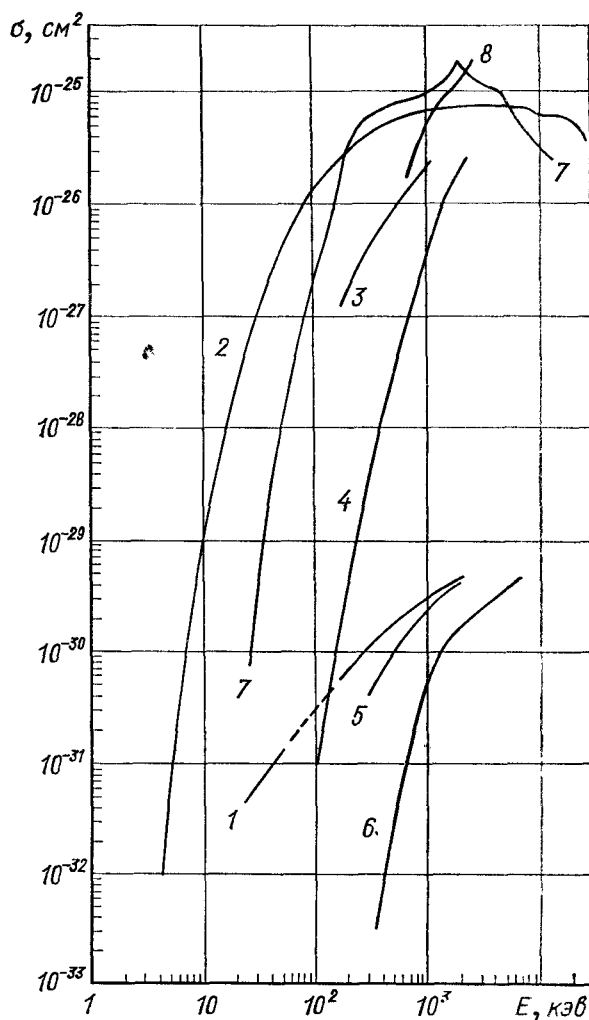


Рис. 43.1. Сечения термоядерных реакций:

- 1 — $^2\text{H}(p, \gamma)^3\text{He}$ [11, 12];
- 2 — $^2\text{H}(d, p)^3\text{H}$ [13—25];
- 3 — $^3\text{He}(t, d)^4\text{He}$ [43];
- 4 — $^3\text{He}(^3\text{He}, p)$ [44, 84];
- 5 — $^3\text{H}(\alpha, \gamma)^7\text{Li}$ [45];
- 6 — $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$ [46, 82, 83];
- 7 — $^6\text{Li}(p, \alpha)^3\text{He}$ [47, 48, 86, 87];
- 8 — $^6\text{Li}(t, n)$ [57].

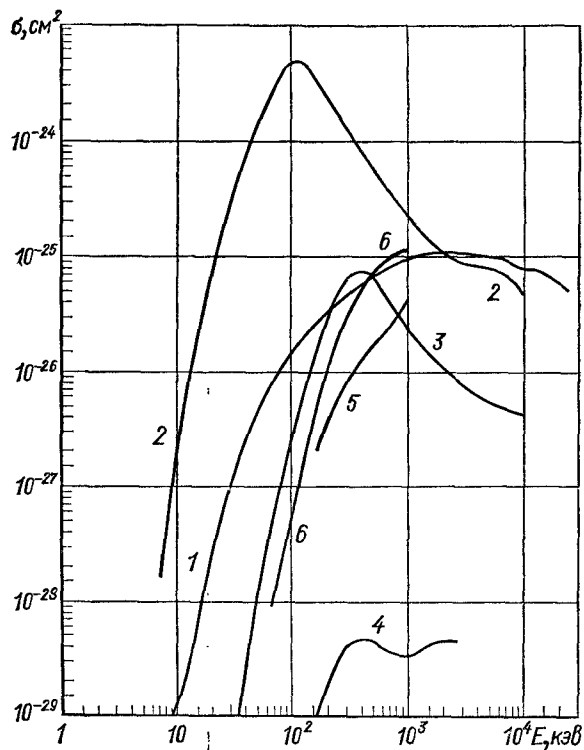


Рис. 43.2. Сечения термоядерных реакций:

- 1 — ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$ [13, 14, 18, 21–27];
- 2 — ${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$ [13, 31–36];
- 3 — ${}^3\text{He}(d, p){}^4\text{He}$ [13, 38–41];
- 4 — ${}^3\text{He}(d, \gamma){}^5\text{Li}$ [42];
- 5 — ${}^3\text{He}(t, pn){}^4\text{He}$ [43];
- 6 — ${}^6\text{Li}(d, p){}^7\text{Li}$ [49–51].

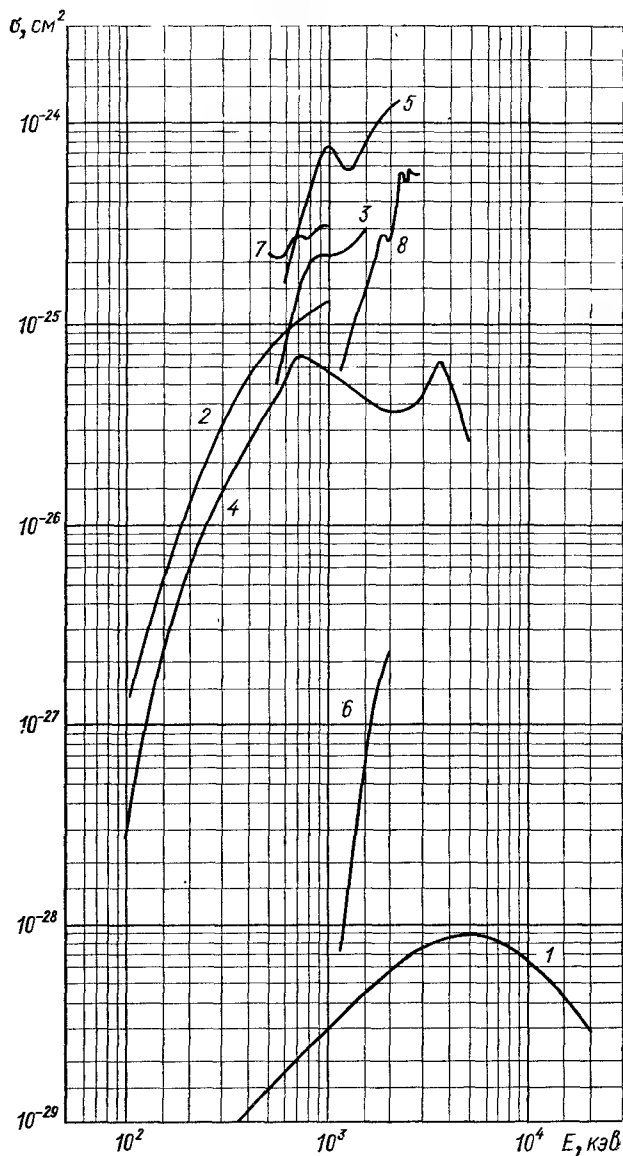


Рис. 43.3. Сечения термоядерных реакций:

- 1 — ${}^3\text{H}(p, \gamma){}^4\text{He}$ [28–30];
- 2 — ${}^6\text{Li}(d, n){}^7\text{Be}$ [49, 52, 53];
- 3 — ${}^6\text{Li}(d, t){}^5\text{He}$ [54];
- 4 — ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ [53, 55, 56];
- 5 — ${}^7\text{Li}(t, n){}^8\text{Be}$ [57];
- 6 — ${}^7\text{Li}({}^7\text{Li}, p){}^{13}\text{B} + {}^7\text{Li}({}^7\text{Li}, d){}^{12}\text{B}$ [64];
- 7 — ${}^9\text{Be}(p, d){}^8\text{Be}$ [65];
- 8 — ${}^9\text{Be}(t, n){}^{11}\text{B}$ [68].

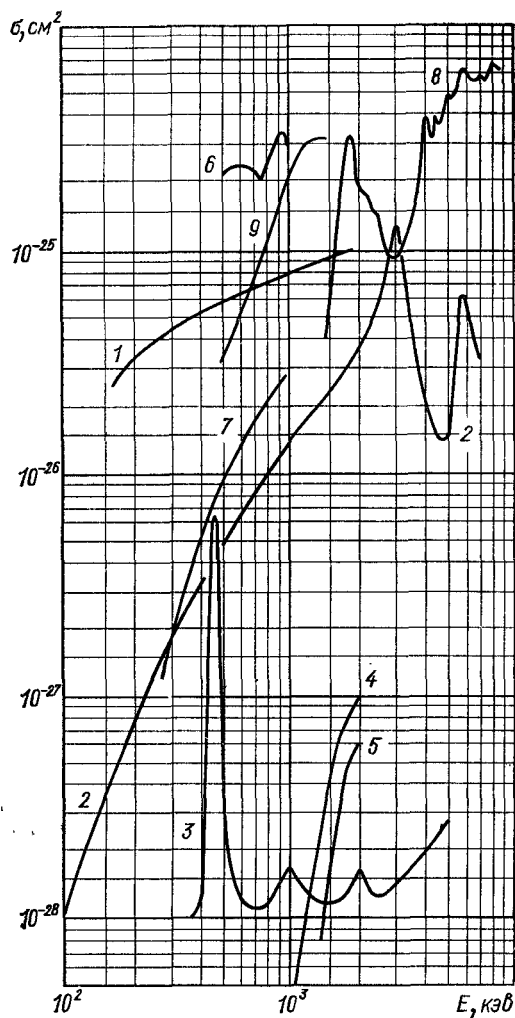


Рис. 43.4. Сечения термоядерных реакций:

- 1 — $^3\text{H}(t, n)$ [37];
- 2 — $^7\text{Li}(p, d)$ ^4He [56, 58–60];
- 3 — $^7\text{Li}(p, \gamma)$ ^8Be [61–63];
- 4 — $^6\text{Li}(^7\text{Li}, p)$ ^{12}B [64];
- 5 — $^7\text{Li}(^7\text{Li}, ^8\text{Be})$ ^6He [64];
- 6 — $^9\text{Be}(p, \alpha)$ ^6Li [65];
- 7 — $^9\text{Be}(d, p)$ ^{10}Be [66, 67];
- 8 — $^9\text{Be}(\alpha, n)$ ^{12}C [69, 70, 85];
- 9 — $^{10}\text{B}(d, n)$ [75].

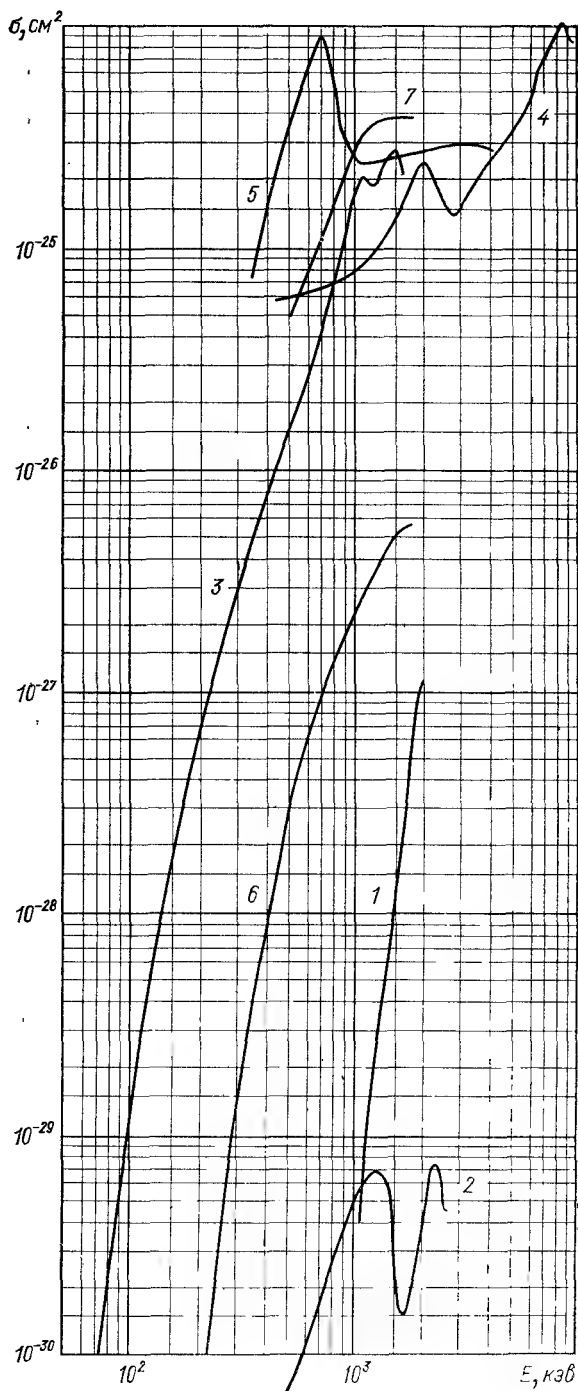


Рис. 43.5. Сечения термоядерных реакций:

- 1 — $^9\text{Be}(^7\text{Li}, ^8\text{Li})$ ^8Be [64];
- 2 — $^{10}\text{B}(p, \gamma)$ ^{11}C [71];
- 3 — $^{10}\text{B}(p, \alpha)$ ^7Be [72–74];
- 4 — $^{10}\text{B}(\alpha, n)$ ^{13}N [70];
- 5 — $^{11}\text{B}(p, \alpha)$ ^8Be [76, 77];
- 6 — $^{11}\text{B}(d, p)$ ^{12}B [78];
- 7 — $^{11}\text{B}(d, n)$ [75].

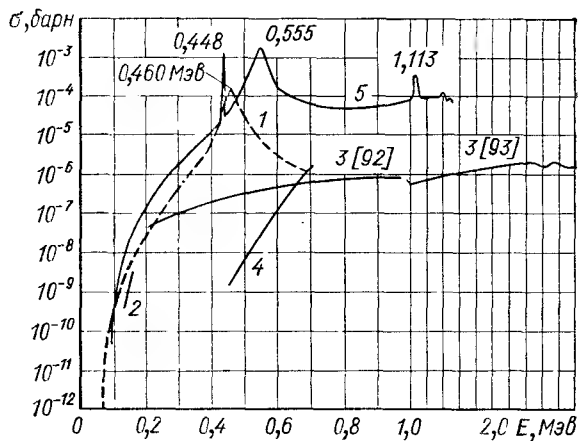


Рис. 43.6. Сечения термоядерных реакций:

- 1 — $^{12}\text{C}(p, \gamma) ^{13}\text{N}$ [4, 9, 79—81];
- 2 — $^{14}\text{N}(p, \gamma) ^{15}\text{O}$ [9, 81];
- 3 — $^7\text{Be}(p, \gamma) ^8\text{B}$ [92, 93];
- 4 — $^{13}\text{C}(\alpha, n) ^{16}\text{O}$ [6];
- 5 — $^{13}\text{C}(p, \gamma) ^{14}\text{N}$ [5].

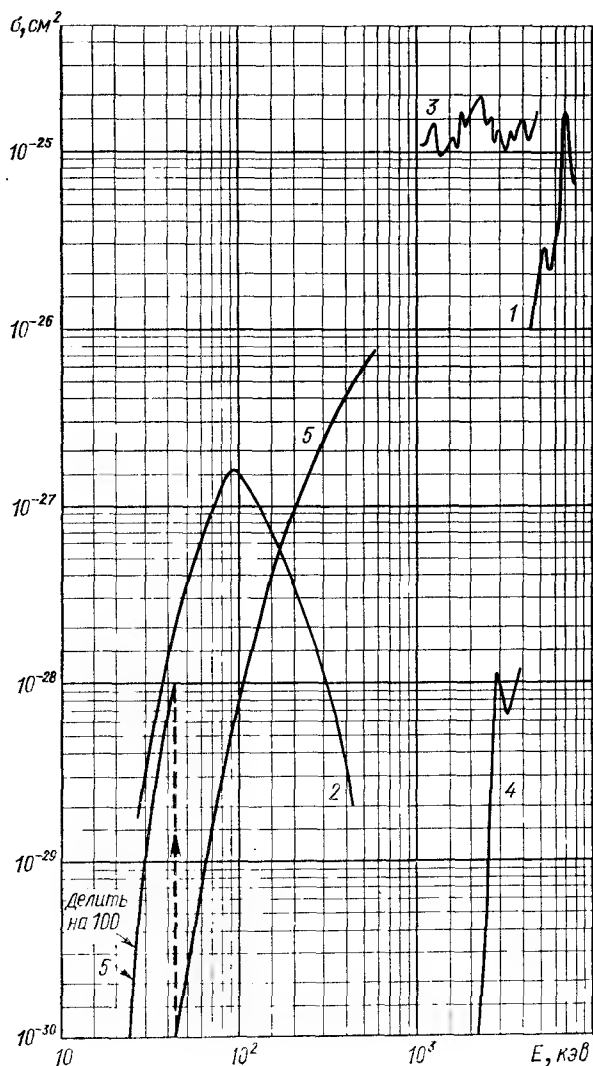


Рис. 43.7. Сечения термоядерных реакций:

- 1 — $^7\text{Li}(\alpha, n) ^{10}\text{B}$ [70, 88];
- 2 — $\text{T}(d, \gamma) ^5\text{He}$ [89];
- 3 — $^{12}\text{C}(d, n) ^{13}\text{N}$ [90];
- 4 — $^{18}\text{O}(\alpha, \gamma) ^{22}\text{Ne}$ [91];
- 5 — $^7\text{Li}(p, \alpha) ^4\text{He}$ [7, 8, 86].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mattaugh J. H. E. e. a. "Nucl. Phys.", 1965, v. 67, p. 1.
2. Ajzenberg-Selove F., Lauritsen T. "Nucl. Phys.", 1959, v. 11, p. 1; 1966, v. 78, p. 1; "Rev. Mod. Phys.", 1955, v. 27, p. 66; "Nucl. Phys.", 1968, v. A114, p. 1.
3. Ajzenberg-Selove F. "Nucl. Phys.", 1970, v. A152, p. 1, 1971, v. A 166, p. 1; 1972, v. A190, p. 1.
4. Дейнеко А. С. и др. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1957, т. 32, с. 251.
5. Fowler W. A. e. a. "Ann. Rev. Astron. and Astrophys.", 1967, v. 5, p. 525.
6. Davis C. N. "Nucl. Phys.", 1968, v. A110, p. 619.
7. Spinka H., Tombrello T. "Nucl. Phys.", 1971, v. A164, p. 1.
8. Fiedler O., Kunze P. "Nucl. Phys.", 1967, v. A96, p. 513.
9. Burbidge E. M. e. a. "Rev. Mod. Phys.", 1957, v. 29, p. 547.
10. Holmgren H. D., Jonston R. L. "Phys. Rev.", 1959, v. 113, p. 1556.
11. Griffiths G. M. e. a. «Canad. J. Phys.», 1962, v. 40, p. 402.
12. Griffiths G. M., Lal M., Scarfe C. D. "Canad. J. Phys.", 1963, v. 41, p. 724.
13. Arnold W. R. e. a. "Phys. Rev.", 1954, v. 93, p. 483.
14. Cook C. F., Smith J. R. "Phys. Rev.", 1953, v. 89, p. 785.
15. Blair J. M. e. a. "Phys. Rev.", 1948, v. 74, p. 1599.
16. Wenzel W. A., Whaling W. "Phys. Rev.", 1952, v. 88, p. 1149.
17. Sanders J. H., Moffatt J., Roaf D. "Phys. Rev.", 1951, v. 81, 602.

18. Preston G., Shaw P. F., Joung S. A. "Proc. Roy. Soc.", 1954, v. A226, p. 206.
19. Allred J. C., Phillips D. D., Rosen L. "Phys. Rev.", 1951, v. 82, p. 782.
20. Magnag-Vallette D. e. a. "J. Phys. et Radium", 1960, v. 21, p. 125.
21. Von Engel A., Goodyear C. C. "Proc. Roy. Soc.", 1961, v. A264, p. 445.
22. Волков В. В. и др. В сб.: Ядерные реакции на легких ядрах. М., Атомиздат, 1957, с. 15.
23. Ганеев А. С. и др. См. [22], с. 26.
24. Brolley J. E., Putnam T. M., Rosen L. "Phys. Rev.", 1957, v. 107, p. 820.
25. Van Oers W. T. M., Brockman K. W. "Nucl. Phys.", 1963, v. 48, p. 625.
26. Давиденко В. А. и др. См. [22], с. 7.
27. Hunter G. F., Richard H. T. "Phys. Rev.", 1949, v. 76, p. 1445.
28. Fuller E. G. "Phys. Rev.", 1954, v. 96, p. 1306.
29. Perry J. E., Bame S. J. "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 1368.
30. Gemmel D. S., Jones G. A. "Nucl. Phys.", 1962, v. 33, p. 102.
31. Fowler J. L., Brolley J. E. "Revs Mod. Phys.", 1956, v. 28, p. 103.
32. Conner J. E., Bonner T. W., Smith J. R. "Phys. Rev.", 1952, v. 88, p. 468.
33. Argo H. V. e. a. "Phys. Rev.", 1952, v. 87, p. 612.
34. Bame S. J., Perry J. E. "Phys. Rev.", 1957, v. 107, p. 1616.
35. Fowler J. L., Stovall E. J. "Phys. Rev.", 1951, v. 82, p. 502.
36. Балабанов Е. М. и др. См. [22], с. 48, 57.
37. Говоров А. М. и др. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1962, т. 42, с. 383.
38. Bonner T. W., Conner J. E., Little A. B. "Phys. Rev.", 1952, v. 88, p. 473.
39. Allred J. C. "Phys. Rev.", 1951, v. 84, p. 695.
40. Yarnell J. L., Lovberg R. H., Stratton W. R. "Phys. Rev.", 1953, v. 90, p. 292.
41. Клюгарев А. П., Есельсон Б. Н., Вальтер А. К. «Докл. АН СССР», 1956, т. 109, с. 737.
42. Blair J. M., Hintz N. M., Van Patter D. M. "Phys. Rev.", 1954, v. 96, p. 1023.
43. Ли Га Ен и др. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1960, т. 39, с. 225.
44. Good W. M., Kunz W. E., Moak C. D. "Phys. Rev.", 1954, v. 94, p. 87.
45. Griffiths G. M. e. a. "Canad. J. Phys.", 1961, v. 39, p. 1397.
46. Holmgren H. D., Johnston R. L. "Phys. Rev.", 1959, v. 113, p. 1556.
47. Jeronimo J. M. F., Mani G. S., Sadegh A. "Nucl. Phys.", 1963, v. 43, p. 417.
48. Temmer G. M. Proc. Conf. on Direct Interaction and Nucl. Reaction Mechanisms, Padua, 1962. Ed. by E. Clementel and C. Villi, N. Y.—Lond., Cordow and Breach Science Publishers, 1963, v. 1, p. 1013.
49. Whaling W., Bonner T. W. "Phys. Rev.", 1950, v. 79, p. 258.
50. Nickel W. E. "Phys. Rev.", 1954, v. 95, p. 426.
51. Роуз Д., Кларк М. Физика плазмы и управляемые термоядерные реакции. М., Госатомиздат, 1963.
52. Birk M. e. a. "Nucl. Phys.", 1963, v. 41, p. 58.
53. Hirst F., Johnston J., Pool M. J. "Philos. Mag.", 1954, v. 45, p. 762.
54. Macklin R. L., Banta H. E. "Phys. Rev.", 1955, v. 97, p. 753.
55. Jeronimo J. M. F. e. a. "Nucl. Phys.", 1962, v. 38, p. 11.
56. Heydenburg N. P. e. a. "Phys. Rev.", 1948, v. 77, p. 405.
57. Вальтер А. К. и др. «Атомная энергия», 1961, т. 10, с. 577.
58. Timm U. "Naturwissenschaften", 1957, Bd. 44, s. 279; 1958, Bd. 45, S. 204.
59. Cassongnou Y. e. a. "Nucl. Phys.", 1962, v. 33, p. 449; 1963, v. 41, p. 164; 1962, v. 42, p. 353.
60. Теплов И. Б. и др. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1962, т. 42, с. 353.
61. Wilkinsow D. H. "Philos. Mag.", 1954, v. 45, p. 259.
62. Hunt S. E. "Proc. Phys. Soc.", 1952, v. A65, p. 982.
63. Bonner T. W., Evans J. E. "Phys. Rev.", 1948, v. 73, p. 666.
64. Norbeck E., Littlejohn C. S. "Phys. Rev.", 1957, v.—108, p. 754.
65. Talbott F. L., Busala A., Weissenbach G. C. "Phys. Rev.", 1951, v. 82, p. 1.
66. Resnick J., Hanna S. S. "Phys. Rev.", 1951, v. 82, p. 463.
67. Biggerstaff J. A. e. a. "Nucl. Phys.", 1962, v. 36, p. 631.
68. Вальтер А. К., Вацет П. И. и др. «Укр. физ. журн.», 1961, т. 6 "с. 457.
69. Bonner T. W. e. a. "Phys. Rev.", 1956, v. 102, p. 1348.
70. Gibbons J. H., Macklin R. L. "Phys. Rev.", 1965, v. 137, p. 1508; 1959, v. 114, p. 571.
71. Day R. B., Huus T. "Phys. Rev.", 1954, v. 95, p. 1003.
72. Bach G. G., Liveresy D. J. "Philos. Mag.", 1956, v. 46, p. 824.
73. Bureham W. E., Freeman J. M. "Philos. Mag.", 1950, v. 41, p. 337.
74. Brown A. B., Snyder C. W., Eowler W. A. e. a. "Phys. Rev.", 1951, v. 82, p. 195.
75. Burke W. H., Risser J. R., Phillips G. G. "Phys. Rev.", 1954, v. 93, p. 188.
76. Symons C. D., Treacy P. B. "Nucl. Phys.", 1963, v. 46, p. 93.
77. Beckman O., Huus T., Zupancic C. "Phys. Rev.", 1953, v. 91, p. 606.
78. Hudspeth E. L., Smann C. P. "Phys. Rev.", 1949, v. 76, p. 1150.
79. Bailey C. L., Stratton W. R. "Phys. Rev.", 1950, v. 77, p. 194.
80. Hall R. N., Towler W. A. "Phys. Rev.", 1950, v. 77, p. 197.
81. Lamb W. A. S., Hester R. E. "Phys. Rev.", 1957, v. 107, p. 550.
82. Parker P. D., Kavanagh R. M. "Phys. Rev.", 1963, v. 131, p. 2578.
83. Nagatani K. e. a. "Nucl. Phys.", 1969, v. A128, p. 325.
84. Dwarakanath M. R., Winkler H. "Phys. Rev.", 1971, v. C4, p. 1532.
85. Van der Zwan L., Geiger K. W. "Nucl. Phys.", 1970, v. A152, p. 481.
86. Haworth L. I., King L. D. P. "Phys. Rev.", 1938, v. 54, p. 38.
87. Gemeinhardt W. e. a. "Z. Phys.", 1968, Bd. 197, S. 58.
88. Macklin R. L., Gibbons J. H. "Phys. Rev.", 1968, v. 165, p. 1147.
89. Безотосный В. М. и др. «Ядерная физика», 1969, т. 10, с. 225.
90. Jaszczak R. J. e. a. "Phys. Rev.", 1969, v. 181, p. 1428.
91. Adams A. e. a. "Nucl. Phys.", 1969, v. A131, p. 430.
92. Parker P. D. "Phys. Rev.", 1966, v. 150, p. 851.
93. Vaughn E. J. e. a. "Phys. Rev.", 1970, v. C2, p. 1657.

ПРОХОЖДЕНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

44.1. ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

e — электрон
 p — протон
 d — дейтон (ядро ${}^2_1\text{H}$)
 α — α -частица (ядро ${}^4_2\text{He}$)
 F — осколок деления
 γ — γ -квант
 $m_{0(x)}$ — масса покоя частицы x
 m_x — масса частицы x
 v_x — скорость частицы x
 E_x — кинетическая энергия частицы x
 β — отношение скорости частицы к скорости света, v/c
 μ — массовый или линейный коэффициент ослабления при экспоненциальном законе поглощения
 z и Z — заряды частицы и среды (в единицах заряда электрона)
 трек, — траектория частицы в тормозящей среде
 R_x — пробег частицы, x — путь частицы до полной потери ионизирующей способности; R_x — измеряется в направлении первоначального движения или, если это оговорено (для электронов), вдоль трека
 $H\rho$ — произведение напряженности поля на радиус кривизны траектории заряженной частицы в магнитном поле
 $\bar{R}$ — пробег частиц — средний арифметический пробег частиц данного сорта и энергии
 $R_{\text{экстр}}$ — экстраполированный пробег, определяется экстраполяцией к нулевой интенсивности наиболее крутой части зависимости числа прошедших через слой поглотителя частиц от толщины поглотителя. Используется главным образом для описания пробега электронов в направлении первоначального движения
 $-dE/dx$ — тормозная способность — характеристика удельных потерь энергии в веществе частицей данного сорта отнесенных к плотности мишени.

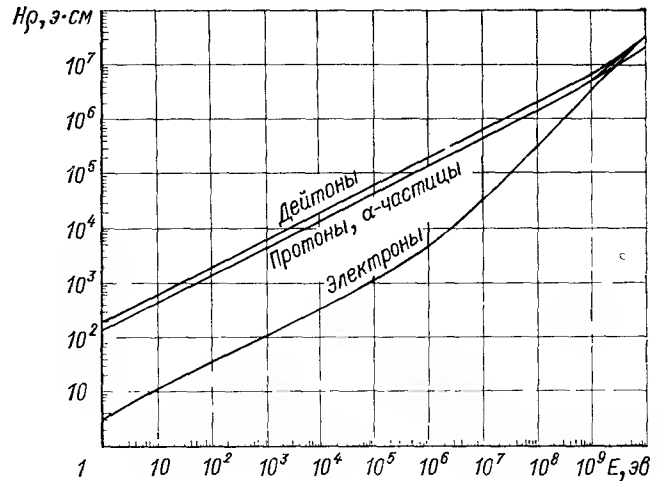


Рис. 44.1. Связь между энергией E заряженных частиц и параметром $H\rho$ [1].

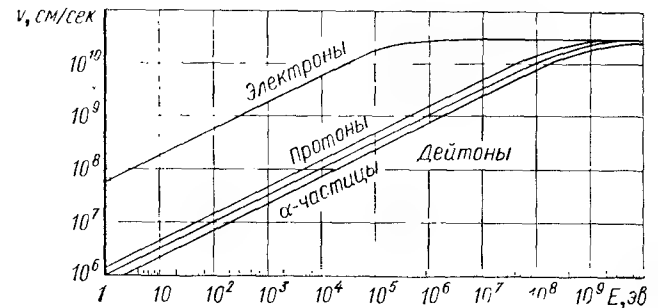


Рис. 44.2. Связь между энергией E и скоростью v заряженных частиц [1].

44.2. КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧАСТИЦ [2]

Масса движущейся частицы

$$m_v = m_0 \frac{E + m_0 c^2}{m_0 c^2} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Параметр $H\rho$ (рис. 44.1) определяется формулой:

$$H\rho = \frac{1}{300z} \sqrt{E^2 + 2Em_0 c^2},$$

где $H\rho$, 10^6 [э·см]; E и $m_0 c^2$ — кинетическая энергия и энергия покоя, Мэв.

Скорость частицы (рис. 44.2):

$$v = c \sqrt{1 - \left(\frac{m_0 c^2}{E + m_0 c^2} \right)^2}.$$

Связь между энергией и импульсом частицы:

$$E = \sqrt{c^2 p^2 + m_0^2 c^4} - m_0 c^2,$$

p — импульс частицы.

44.3. ПРОХОЖДЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

Тяжелые заряженные частицы ($m \gg m_e$) теряют энергию постепенно, в основном за счет ионизации и возбуждения атомов тормозящей среды. Некоторая часть выбитых со своих орбит электронов тормозящей среды (δ -электроны) имеет сравнительно высокую энергию вплоть до $4(m/M)E$ (где m/M — отношение массы электрона и заряженной частицы) и производит вторичную ионизацию. Полная ионизация, т. е. сумма первичной и вторичной ионизаций, обычно в три раза превышает первичную. Параллельный пучок тяжелых заряженных частиц, проходя через вещество, почти не рассеивается. Так, для протонов с энергией 1 Мэв вероятность рассеяния на угол, превышающий 10° , равна 0,53% на 1 см пробега в атмосфере; разброс пробегов моноэнергетических частиц не превышает 1—2%.

Относительная и максимальная тормозная способность различных веществ для протонов [1]

Чем меньше Z , тем больше относительная (по отношению к воздуху) тормозная способность вещества $(dE/dx)_{\text{отн}}$; E_0 — энергия, при которой тормозная способность вещества максимальна; $(dE/dx)_{\text{макс}}$ — максимальное значение тормозной способности.

Вещество	$-(dE/dx)_{\text{отн}}$			E_0 , кэВ	$-(dE/dx)_{\text{макс}}$, МэВ·см ² /г
	100 кэВ	2 МэВ	1000 МэВ		
Водород	2,4	1,52	1,16	30	3400
Воздух	1	1	1	100	620
Алюминий	0,68	0,82	0,91	72	440
Золото	0,14	0,34	0,61	160	100

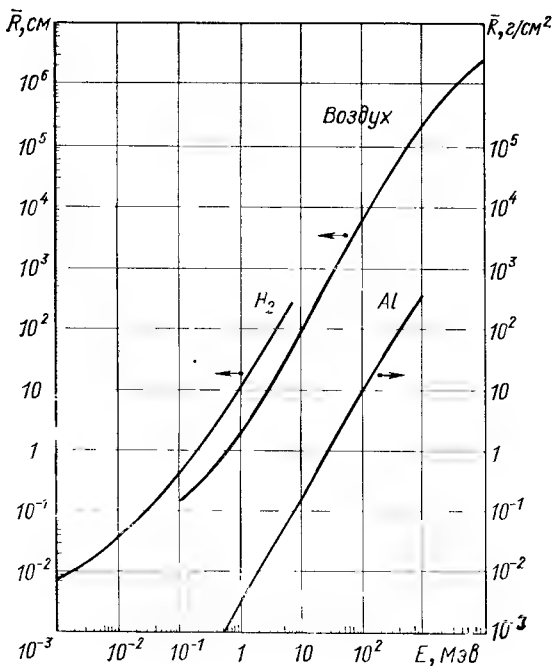


Рис. 44.3. Связь между энергией E и пробегом R протонов в H_2 [1, 3], воздухе [1] и Al [1]. Стрелками указана шкала кривых по оси ординат.

Таблица 44.1

Пробег протонов высокой энергии, г/см², в Be , C , Al , Si , Pb и воздухе [13]

E , МэВ	Be	C	Воздух	Al	Si	Pb
50	2,722	2,488	2,557	2,928	3,599	5,275
75	5,655	5,160	5,293	6,021	7,321	10,52
100	9,461	8,623	8,835	10,01	12,01	17,17
150	19,37	17,63	18,03	20,34	24,35	34,11
200	31,91	29,02	29,64	33,34	39,71	55,14
300	63,33	57,53	58,68	65,79	77,82	107,0
400	101,4	91,99	93,73	104,9	123,5	168,6
500	144,4	131,0	133,3	148,9	174,9	237,6
600	191,3	173,4	176,3	196,7	230,5	312,0
700	241,3	218,6	222,0	247,6	289,5	390,5
800	293,7	265,9	269,8	300,0	350,9	472,2
1000	404,0	365,3	370,0	412,0	479,4	642,2
2000	1007	907,3	910,3	1014	1168	1543
3000	1633	1469	1463	1634	1871	2445
5000	2879	2584	2543	2587	3248	4185
7000	4100	3675	3583	4046	4580	5847
10 000	5889	5270	5081	5777	6512	8234

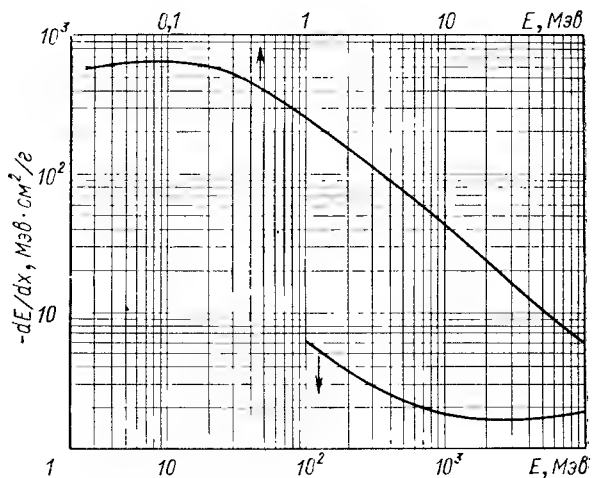


Рис. 44.4. Тормозная способность $-dE/dx$ воздуха для протонов как функция их энергии E [1].

Пробег дейтонов, α -частиц и других тяжелых заряженных частиц

Связь между пробегом протона и пробегом однозарядной частицы другой массы (кроме электрона) дается формулой [4],

$$R_x(E) = \frac{m_x}{m_p} R_p \left(\frac{m_p}{m_x} E \right).$$

Например, пробег дейтонов может быть определен по пробегу протонов с энергией $E_d = 2E_p$.

Для частиц, заряд которых больше единицы и сохраняет постоянное значение на основном участке пробега справедливо соотношение [4]

$$R_p(v) = \frac{m_p}{m_x} z^2 R_x(v) - C,$$

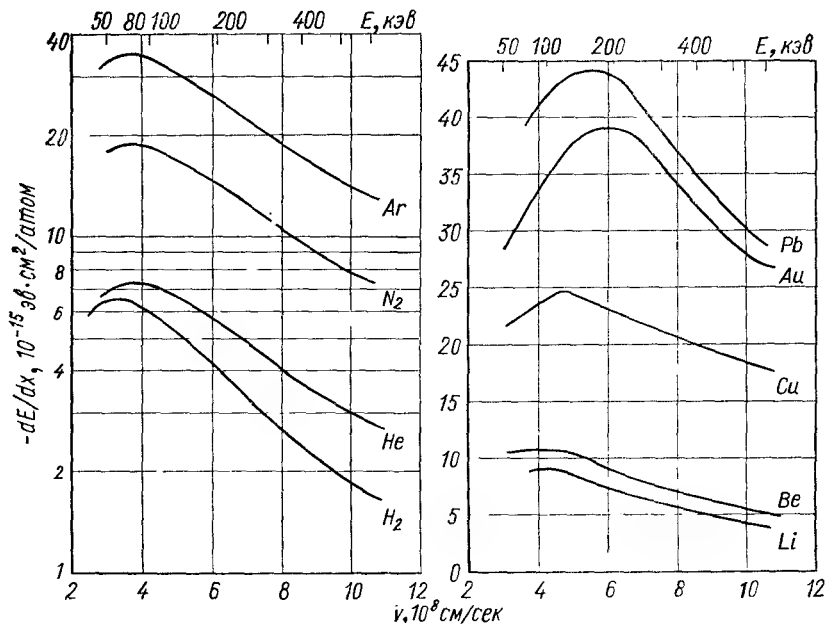


Рис. 44.5. Тормозная способность — dE/dx для протонов как функция их энергии E и скорости v в различных веществах [3].

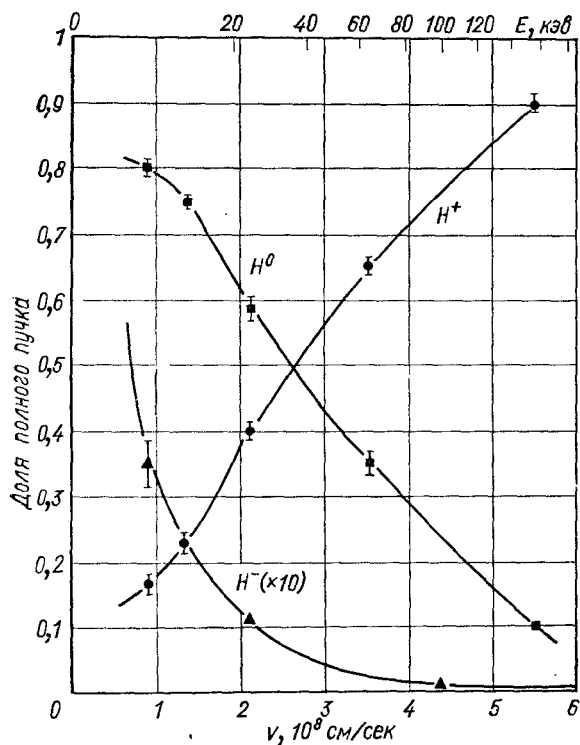


Рис. 44.6. Равновесие между H^+ , H^0 и H^- в алюминиевой фольге как функция энергии E и скорости v протонов [3].

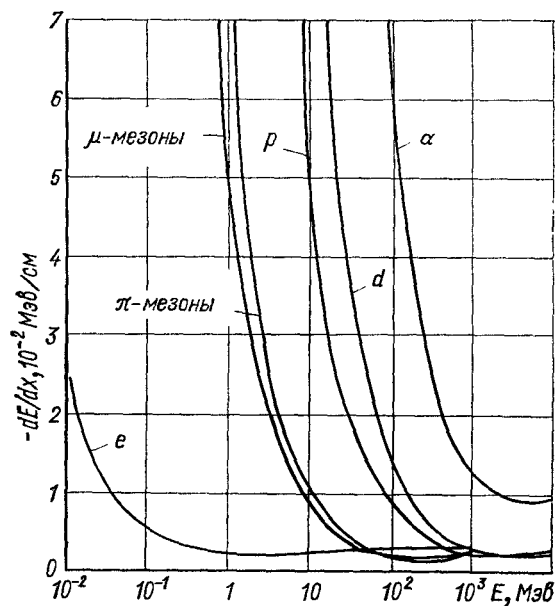


Рис. 44.7. Удельные потери энергии — dE/dx различными заряженными частицами в воздухе [4].

где постоянная C учитывает неодинаковый захват и потерю электронов движущейся частицей и протоном. Для α -частиц

$$R_p(E) = 1,007R_\alpha(3,972E) - 0,2, \quad E \geq 0,5 \text{ Мэв.}$$

Пробег α -частиц в различных веществах (рис. 44.8 и 44.9) может быть рассчитан по их пробегу в воздухе с помощью эмпирической формулы [4]:

$$R_{\alpha, x}(E) = 0,56R_{\alpha, \text{возд}}(E) A^{1/3},$$

где $R_{\alpha, x}$ — пробег в веществе, мг/см^2 ; $R_{\alpha, \text{возд}}$ — пробег в воздухе, см (15°C , 760 мм рт. ст.); A — массовое число вещества.

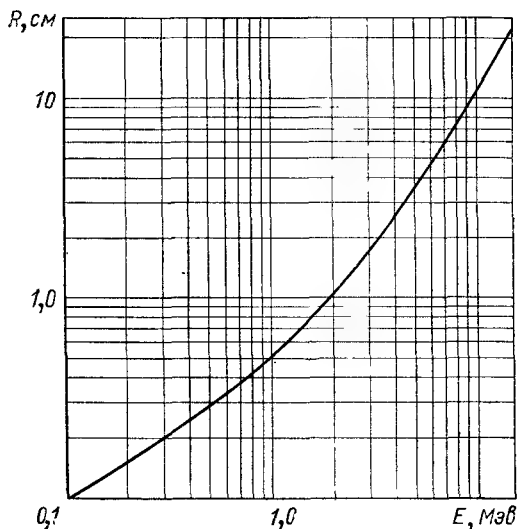


Рис. 44.8 Пробег α -частиц $\bar{R}$ в воздухе (15°C , 760 мм рт. ст.) как функция энергии α -частиц [1].

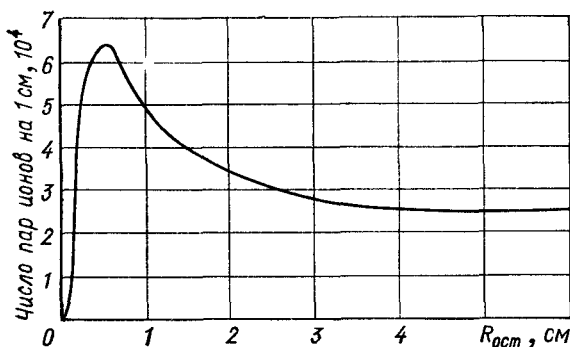


Рис. 44.9. Удельная ионизация воздуха (15°C , 760 мм рт. ст.) α -частицами в зависимости от остаточного пробега $R_{\text{ост}}$, т. е. расстояния от конца пробега данной частицы [4].

Таблица 44.3

Энергия E , расходуемая α -частицами на образование пары ионов в различных газах [1]

Газ	E , эв	Газ	E , эв
Xe	21,3	O ₂	32,3
Kr	22,3	CO ₂	33,8
Ar	24,3	CO	33,9
C ₂ N ₄	26,9	Воздух	34,7
Ne	27,1	H ₂	35,0
CH ₄	29,3	N ₂	36,2
He	30,2		

Прохождение осколков деления через вещество

Заряд осколка деления при прохождении через вещество непрерывно уменьшается. Эффективный заряд осколка определяется приближенным соотношением [1]

$$z_{\text{эф}} \approx z^{1/3} \hbar v / e^2,$$

где Z — заряд ядра осколка; e — заряд электрона, ед. СГСЭ.

Между пробегами осколков деления и α -частиц, имеющих одну и ту же скорость, существует приближенное соотношение [1] (рис. 44.10 и 44.11),

$$\frac{R_F}{R_\alpha} \approx 7 \frac{A_F}{z_F^{3/2}} \left(\frac{e^2}{\hbar v} \right)^2.$$

Таблица 44.4

Усредненные отдельно по тяжелой и легкой группам свойства осколков деления ^{235}U [4]

Параметр	Группа	
	легкая	тяжелая
Массовое число	95	139
Атомный номер	38	54
Начальный заряд	+20	+22
Начальная энергия, Мэв	97	65
Пробег в воздухе R , мм	27	21

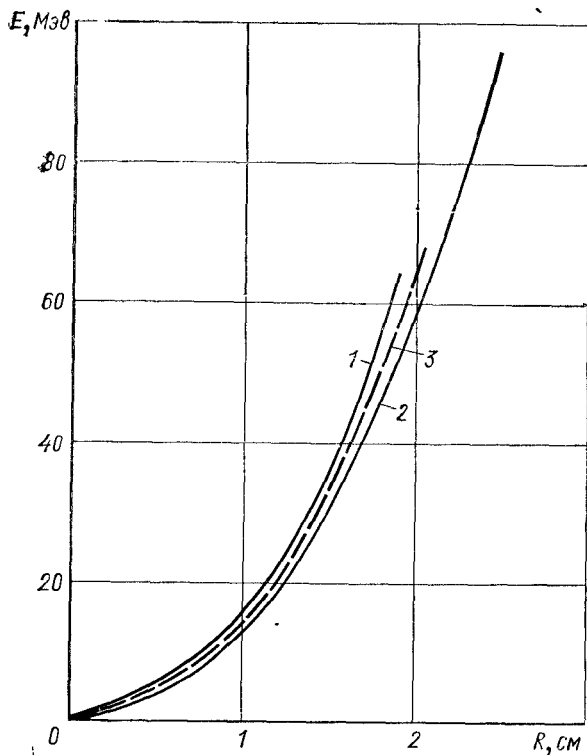


Рис. 44.10. Зависимость пробега осколка деления в воздухе R от оставшейся у него энергии E [5]: 1 — тяжелый осколок; 2 — легкий осколок; 3 — усредненная кривая.

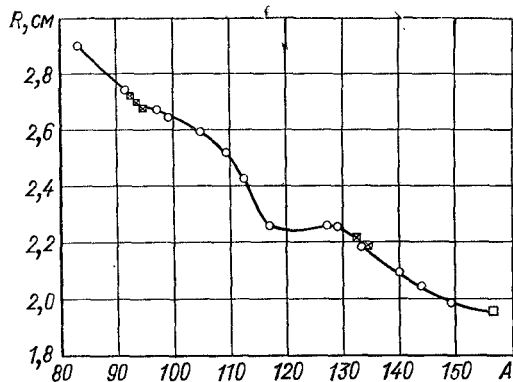


Рис. 44.11. Зависимость экстраполированного пробега R осколков деления ^{238}Pu в воздухе (15°C , 760 мм рт. ст.) от их массового числа A [4]

44.4. ПРОХОЖДЕНИЕ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

По мере торможения в веществе моноэнергетический параллельный пучок электронов трансформируется в диффузный поток со сложным пространственно-энергетическим распределением (рис. 44.12—44.16). Для элект-

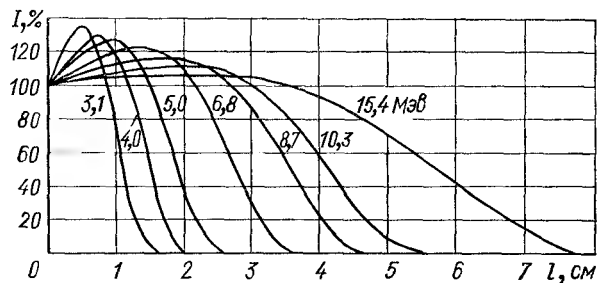


Рис. 44.12. Распределение энергвыделения по глубине при облучении воды электронами различных энергий [6]. Все кривые нормированы к 100% по начальному участку

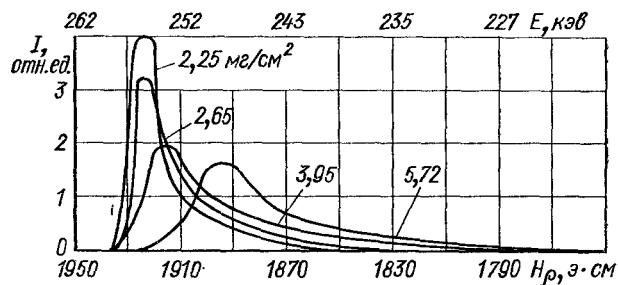


Рис. 44.13. Энергетическое распределение в пучке электронов после прохождения слюды различной толщины. Первоначальная энергия электронов 263 кэВ ($H_F = 1938$) [1].

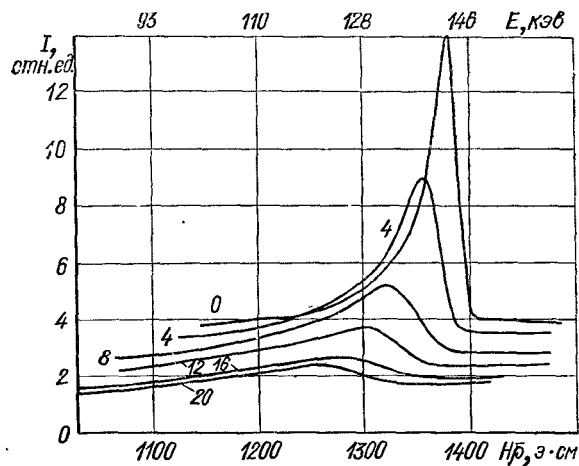


Рис. 44.14. Энергетическое распределение в пучке электронов после прохождения ими стопки медных фольг [6]. Кривые соответствуют прохождению пучка через 0; 4; 8; 12; 16; 20 медных фольг по $0,62\text{ мг/см}^2$ каждая.

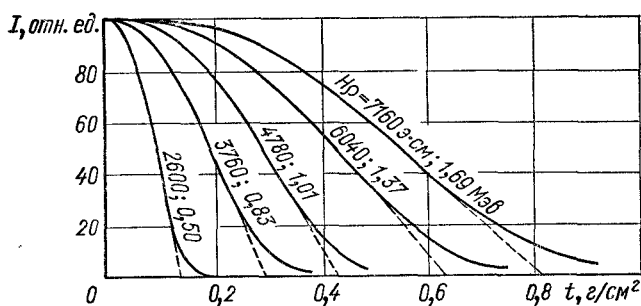


Рис. 44.15. Поглощение параллельного моноэнергетического пучка электронов различной энергии в алюминии [6].

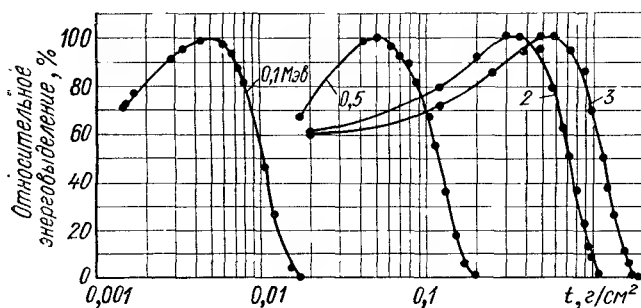


Рис. 44.16. Распределение энерговыведения по глубине t алюминия для электронов различной энергии [6].

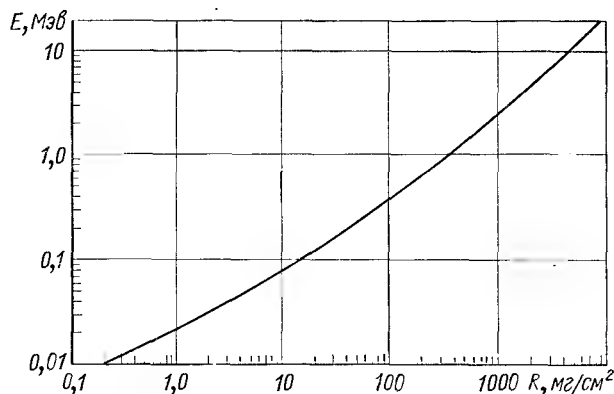


Рис. 44.17. Связь экстраполированного пробега R и энергии электронов в алюминии [4].

ронов поэтому имеют смысл только понятия экстраполированного пробега и пробега вдоль трека (рис. 44.17 и 44.18). В диапазоне от 50 кэв до 3 Мэв зависимость экстраполированного пробега электронов в алюминии от энергии хорошо описывается формулой Фламмерс-фильда [7]:

$$E = 1,92 (R^2 + 0,22R)^{1/2},$$

где E — энергия электронов, Мэв; R — пробег в алюминии, см.

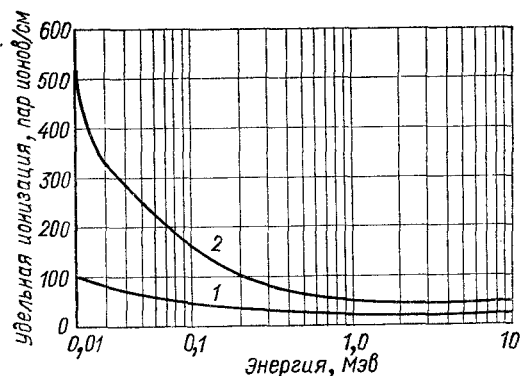


Рис. 44.18. Первичная (1) и полная (2) ионизация воздуха электронами различной энергии [4].

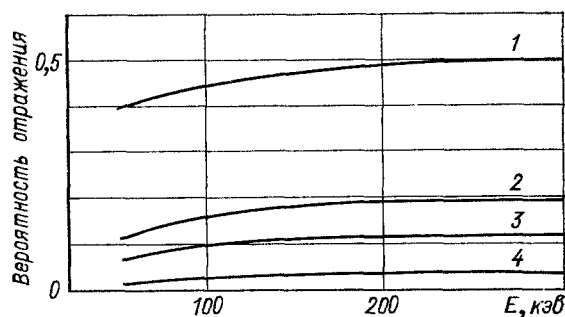


Рис. 44.19. Зависимость вероятности отражения электрона, нормально падающего на поверхность различных материалов, от энергии электрона E [7]: 1 — вольфрам; 2 — сталь; 3 — алюминий; 4 — графит.

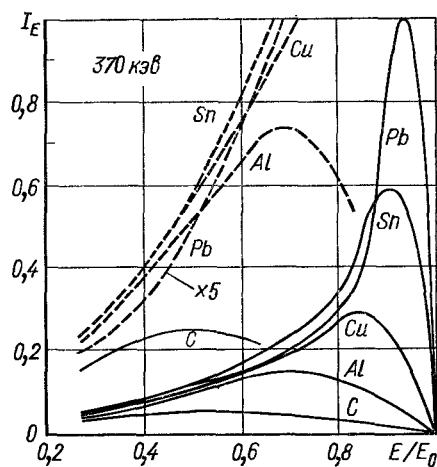


Рис. 44.20. Энергетический спектр электронов, отраженных от различных материалов [6]. $E_0 = 370$ кэв — энергия падающих электронов.

Максимально допустимая толщина водоподобной мишени при энергетической дозе облучения на глубине не менее 60% максимальной [8]

Энергия, Мэв	Толщина мишени, см, при облучении		Энергия, Мэв	Толщина мишени, см, при облучении	
	с одной стороны	с двух сторон		с одной стороны	с двух сторон
0,5	0,15	0,35	5	1,8	4,4
1	0,3	0,7	10	3,7	8,7
2	0,7	1,7	15	5,5	13,0
3	1,1	2,6			

Таблица 44.6

Характеристики торможения электронов в воде и биологической ткани [9]

R — истинный пробег (вдоль трека); $-dE/dx$ — дифференциальные потери энергии; dI/dx — удельная первичная ионизация; $\bar{x}$ — среднее расстояние между первичными ионизациями.

Энергия электронов, кэв	R , мкм	$-dE/dx$, кэв/мкм	dI/dx , пара ионов/мкм	$\bar{x}$, 10^{-2} см
1	0,053	12,3	233	4,3
1,5	0,101	9,4	163	6,1
2	0,160	7,7	127	7,9
3	0,312	5,7	88	11,3
4	0,509	4,6	68	14,7
6	1,025	3,36	47	21,2
8	1,697	2,68	36,6	27,3
10	2,52	2,30	30,1	33,2
15	5,11	1,67	21,4	47
20	8,47	1,34	16,7	60
30	17,33	0,98	11,8	85
40	28,83	0,78	9,3	108
60	58,67	0,538	6,7	149
80	96,48	0,482	5,4	185
100	141	0,417	4,6	216
150	278	0,328	3,55	282
200	444	0,284	3,12	321
300	832	0,238	2,51	398
400	1275	0,217	2,23	448
500	1740	0,205	2,11	473

Мощность тормозного γ -излучения при прохождении быстрых электронов через тонкую мишень может быть рассчитана по формуле [9]:

$$W_{\text{торм}} = 19(E + 511) Z^2 \frac{\rho d}{A} \epsilon,$$

где $W_{\text{торм}}$ — мощность тормозного излучения вт; E — энергия электронов, кэв; Z , A — заряд ядра и массовое число вещества; ρ — плотность мишени, г/см³; d — толщина мишени, см; i — ток электронов, ма. Формула справедлива для $E \ll 1$ Мэв.

Для толстой мишени, в которой электроны полностью тормозятся, интенсивность нефильтрованного тормозного излучения приблизительно равна [9]:

$$W_{\text{торм}} \approx 3 \cdot 10^{-6} E^{1,75} Zi.$$

Значительная часть электронов отражается от мишени (рис. 44.19 и 44.20).

Если источник электронов имеет спектр, подчиняющийся закону простого β -распада, с граничной энергией $E_{\text{макс}}$, то число электронов, прошедших через слой поглотителя, убывает с увеличением толщины поглотителя приблизительно экспоненциально вплоть до коэффициента ослабления ~ 20 (рис. 44.21).

Толщина поглотителя, необходимая для уменьшения числа электронов вдвое (слой «половинного ослабления») приближенно равняется [7]:

$$d \approx 0,095 \frac{Z}{A} E_{\text{макс}}^{3/2},$$

где d — толщина слоя половинного ослабления, г/см²; Z и A — заряд и массовое число ядра-мишени; $E_{\text{макс}}$ — граничная энергия, Мэв. Формула применима для всех элементов от водорода до меди.

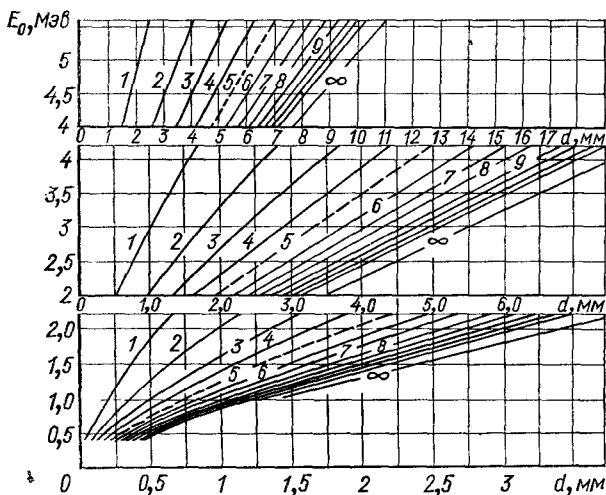


Рис. 44.21. Абсорбционные кривые для определения максимальной энергии β -спектра. E_0 — энергия; d — толщина алюминия, необходимая для уменьшения интенсивности в 2^n раз. Значение n проставлено в разрывах кривых.

Если пучок электронов проходит через достаточно тонкую фольгу, так что потерями энергии можно пренебречь, то средний квадрат угла рассеяния электронов в лабораторной системе координат после прохождения фольги равен [1]:

$$\overline{\theta^2} = 0,157 \frac{Z(Z+1)}{A} \frac{a}{(mv)^2} \ln \left[4\pi Z^{4/3} N d \left(\frac{h}{mv} \right)^2 \right],$$

где d — толщина фольги, г/см²; p — импульс; m — масса и v — скорость электрона; $[pv] = [Мэв]$; N — число атомов в 1 см³ вещества; A и Z — массовое число и заряд ядра вещества фольги.

Данные табл. 44.5 позволяют оценить максимальную толщину водоподобной мишени при неравномерности облучения $\pm 20\%$ среднего значения.

Спектральное распределение тормозного γ -излучения (исключая характеристическое рентгеновское излучение) почти не зависит от атомного номера мишени, а относительное спектральное распределение $h\nu/E$ почти не зависит от энергии моноэнергетических электронов

или максимальной энергии электронов β -спектра (рис. 44.23). Угловое распределение тормозного излучения ориентировано преимущественно вперед по пути замедляющихся электронов, его диаграмма направленности тем уже, чем больше энергия электронного пучка (рис. 44.22).

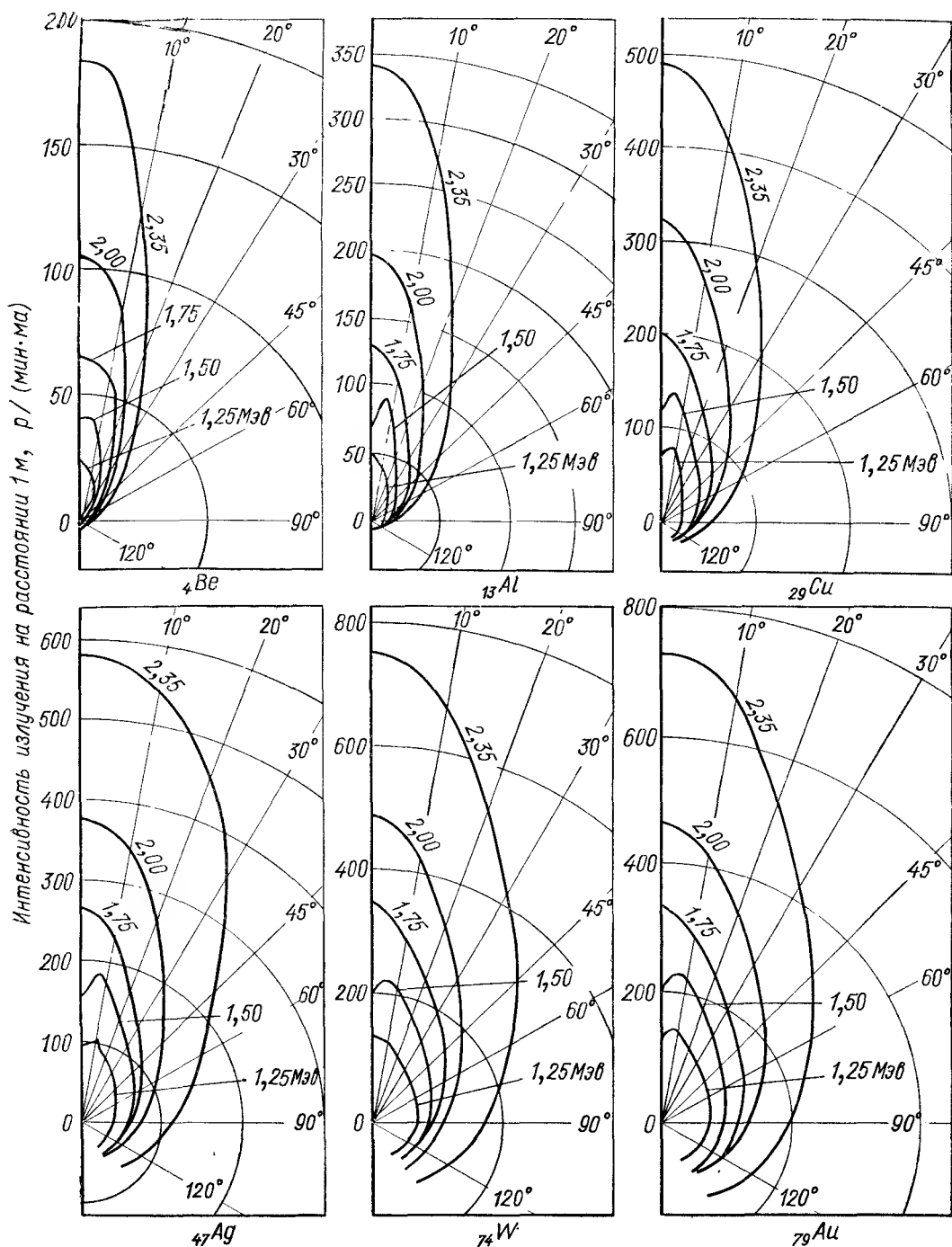


Рис. 44.22. Интенсивность и угловое распределение тормозного излучения, испускаемого моноэнергетическими электронами в мишенях, толщина которых немного больше максимальной длины свободного пробега электронов [7].

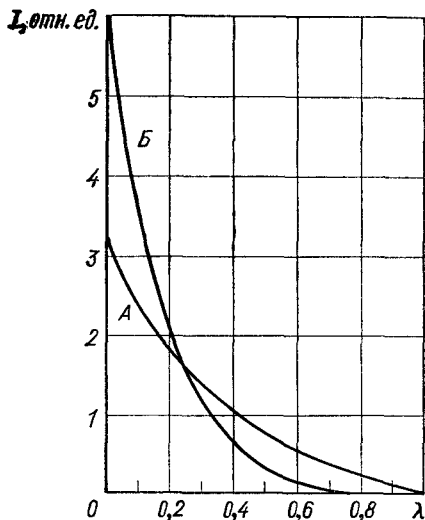


Рис. 44.23. Относительное распределение интенсивности тормозного излучения, образующегося при полной остановке электронов. *A* — моноэнергетические электроны энергии E_0 ; *B* — спектр β -излучения с максимальной энергией E_0 . Параметр $\lambda = hc/E_0$. Площадь под обеими кривыми нормирована к единице [7].

44.5. ПРОХОЖДЕНИЕ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

При прохождении через вещество γ -излучение испытывает три основных типа взаимодействия: фотоэффект, комптоновское рассеяние и эффект образования электронно-позитронных пар (рис. 44.24, 44.25). При фотоэффекте γ -квант исчезает, передав всю свою энергию

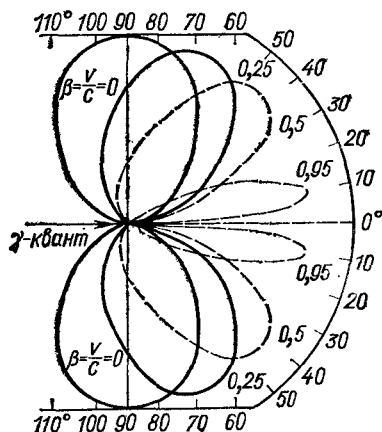


Рис. 44.24. Угловое распределение фотоэлектронов для малой (сплошная линия) и большой (прерывистая линия) энергий фотонов. Значение β около критических соответствует энергии фотоэлектронов [14].

связанному электрону. Эффективное сечение фотоэффекта для γ -квантов малой энергии характеризуется скачкообразной зависимостью от длины волны. Эмпирическая формула Викторина, описывающая величину фотоэффекта для длин волн, меньших λ_K (границная длина волны, за которой начинается поглощение на K -оболочке), имеет вид [14]:

$$\mu_{\text{ф}} \approx \rho C \lambda^3 - \rho D \lambda^4.$$

Здесь $\mu_{\text{ф}}$ — линейный коэффициент ослабления пучка γ -квантов за счет фотоэффекта, см^{-1} ; ρ — плотность,

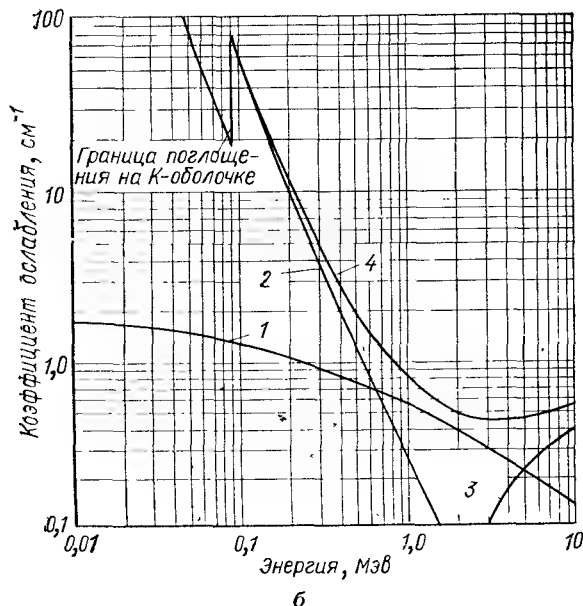
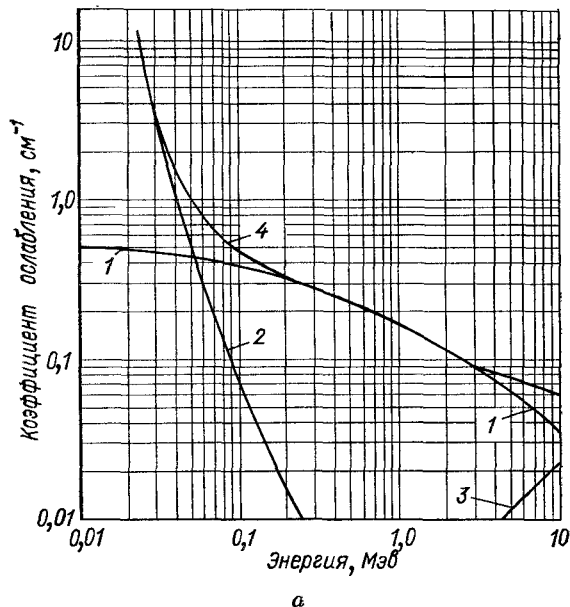


Рис. 44.25. Коэффициенты ослабления γ -квантов в алюминии (*a*) и свинце (*б*) [7] за счет различных процессов: 1 — комптон-эффект; 2 — фотоэффект; 3 — образование пар; 4 — полный коэффициент ослабления.

$g/\text{см}^3$; λ — длина волны, Å; C и D — эмпирические константы, значения которых для ряда элементов приведены в табл. 44.7.

Таблица 44.7
Константы формулы Викторина [4]

Элемент	Z	C	D	$\lambda_K, \text{Å}$
C	6	1,211	0,0183	43,5
N	7	2,034	0,0393	31,1
O	8	3,161	0,07739	23,5
Al	13	14,69	0,8583	7,935
Fe	26	129	28,41	1,739
Cu	29	178,9	49,09	1,377
Br	35	313,7	127	0,918
Ag	47	808,8	624,8	0,4844
Pb	82	4537	13 998	0,1404
Вода	—	2,808	0,06873	(23,5)
Воздух	—	2,762	0,1017	(23,5)

Угловое распределение фотоэлектронов, вырванных из атома при фотоэлектрическом рассеянии, показано на рис. 44.25.

Длина волны γ -кванта при комптоновском рассеянии на свободном электроне увеличивается на $\Delta\lambda$ [9]:

$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \varphi) = 0,02427 (1 - \cos \varphi), \text{ Å}$$

где φ — угол рассеяния γ -кванта.

Таблица 44.8
Сечения комптоновского рассеяния σ_K γ -квантов, рассчитанные на один электрон [7]

$E, \text{Мэв}$	$\sigma_K, \text{барн}$	$E, \text{Мэв}$	$\sigma_K, \text{барн}$	$E, \text{Мэв}$	$\sigma_K, \text{барн}$
0,010	0,6370	0,3	0,3535	6	0,07320
0,015	0,6270	0,4	0,3167	8	0,05990
0,020	0,6160	0,5	0,2892	10	0,05100
0,030	0,5960	0,6	0,2675	15	0,03773
0,040	0,5780	0,8	0,2350	20	0,03024
0,050	0,5610	1,0	0,2112	30	0,02199
0,060	0,5460	1,5	0,1716	40	0,01746
0,080	0,5170	2,0	0,1464	50	0,01456
0,100	0,4929	3,0	0,1151	60	0,01254
0,150	0,4436	4,0	0,0960	80	0,00988
0,200	0,4066	5,0	0,0820	100	0,00820

Максимальное значение $\Delta\lambda$ (при рассеянии назад) равно удвоенной комптоновской длине волны 0,0484 Å, что соответствует 255,5 кэв. Неупруго рассеянные γ -кванты не могут иметь большей энергии при обратном рассеянии. На рис. 44.26 представлены дифференциальные, а в табл. 44.8 — полные сечения комптоновского рассеяния в зависимости от энергии γ -квантов. В табл. 44.9 даны энергии γ -квантов, испытавших комптоновское рассеяние.

Эффективное сечение процесса образования пар $\sigma_{\text{пар}}$ равно нулю при $h\nu < 2m_0c^2$ [1, 14].

Для энергий в несколько мегаэлектронвольт $\sigma_{\text{пар}} \sim Z^2 (h\nu - 2m_0c^2)$. Для больших энергий $\sigma_{\text{пар}} \sim Z^2 \ln(h\nu)$.

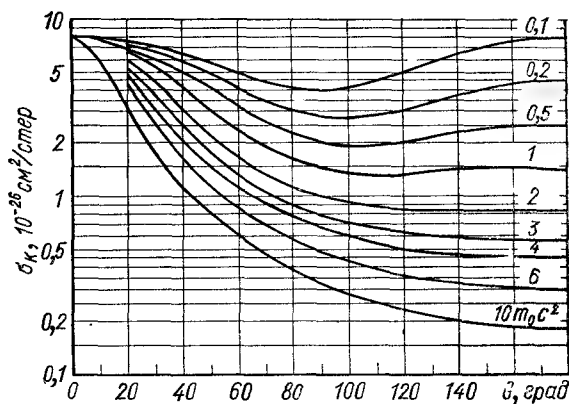


Рис. 44.26. Зависимость комптоновского дифференциального сечения рассеяния на один электрон $\sigma_K(\theta)$ от энергии $E/E_0 = h\nu/mc^2$ (цифры у кривых) и угла рассеяния θ γ -квантов [7].

Таблица 44.9

Энергия γ -квантов, Мэв, испытавших комптоновское рассеяние [7]

Угол рассеяния, град	Энергия падающих γ -квантов, Мэв			
	0,5	1,25	3,0	6,0
10	0,4925	1,204	2,749	5,075
20	0,4715	1,086	2,203	3,481
30	0,4408	0,936	1,663	2,300
40	0,4051	0,789	1,249	1,576
60	0,3332	0,556	0,749	0,857
90	0,2501	0,357	0,428	0,461
120	0,1998	0,263	0,300	0,316
150	0,1743	0,220	0,246	0,256
180	0,1665	0,208	0,211	0,239

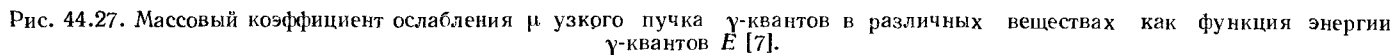
Прохождение узкого монохроматического пучка γ -квантов через вещество

Всякое взаимодействие γ -кванта с веществом выводит его из узкого пучка, поэтому ослабление такого пучка происходит экспоненциально по мере увеличения протяженности среды l :

$$J = J_0 \exp(-\mu l).$$

Линейный коэффициент ослабления μ определяется всеми парциальными коэффициентами взаимодействия:

$$1/\mu = N(\sigma_{\text{ф}} + \sigma_K + \sigma_{\text{пар}}).$$



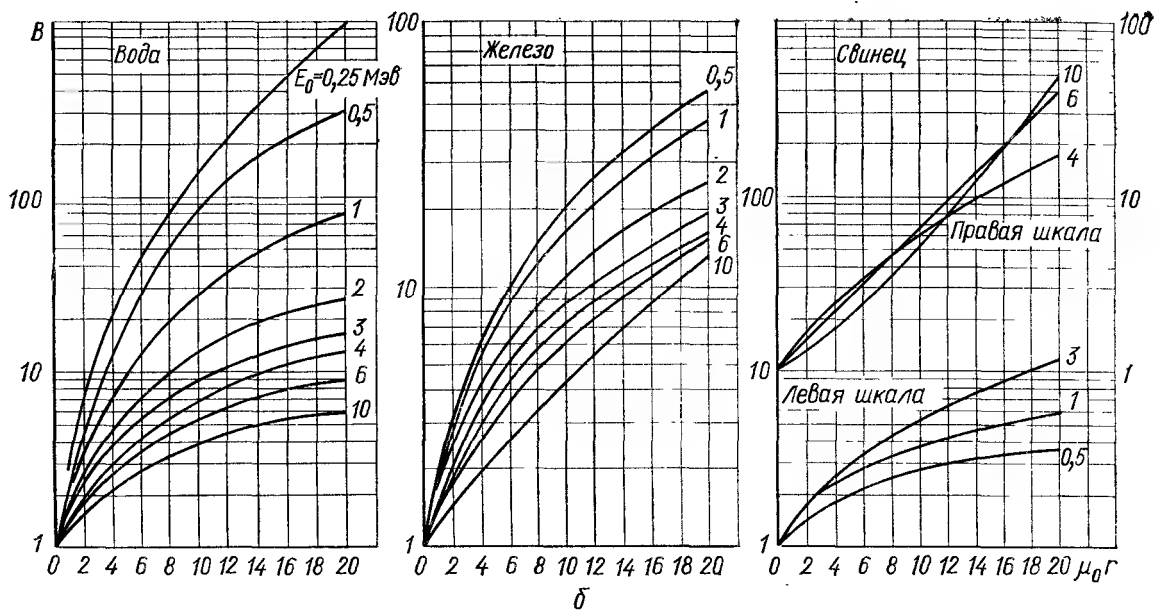
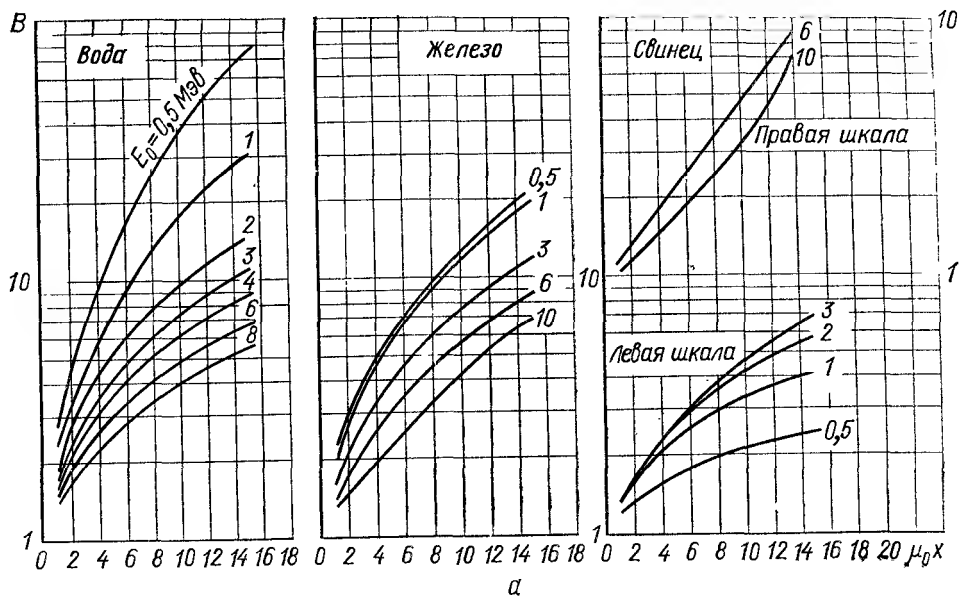


Рис. 44.28. Дозовый фактор накопления B как функция толщины защиты для плоского мононаправленного (а) и точечного изотропного (б) источников [7].

Здесь N — число ядер среды в 1 см^3 ; $\sigma_{\text{ф}}$, $\sigma_{\text{к}}$, $\sigma_{\text{пар}}$ — сечения фото- и комптон-эффекта и сечение образования пар в расчете на один атом. В случае весьма узкого пучка γ -квантов значительную роль может играть также их упругое рассеяние без потери энергии, происходящее в основном на малые углы, интегральный вклад которого мал по сравнению с комптоновским рассеянием.

На рис. 44.27 приведены массовые коэффициенты ослабления для узкого пучка γ -квантов в зависимости от атомного номера поглотителя и энергии γ -квантов.

Ослабление широких пучков γ -квантов

Широкий пучок γ -квантов ослабляется в меньшей степени, чем узкий, из-за обратного попадания в него рассеянных квантов.

Широкий, первоначально параллельный пучок ослабляется иначе, чем сферически расходящийся из

точечного источника. Обычно закон ослабления широкого пучка записывают в виде

$$J = J_0 \exp(-\mu l) B(\mu l, h\nu, Z),$$

где μ — линейный коэффициент ослабления узкого пучка, B — фактор накопления. Для узкого пучка $B \equiv 1$. Поскольку энергия, донесенная γ -квантами до данной поверхности не вполне пропорциональна их биологическому действию, то в силу деформации энергетического спектра различают энергетический и дозовый факторы накопления.

На рис. 44.28 представлены зависимости дозового фактора накопления от толщины и материала защиты энергии первичного источника γ -квантов.

Защита от γ -излучения

Таблица 44.10

Толщина защиты из свинца. *мм*, в зависимости от кратности ослабления и энергии γ -излучения (широкий пучок) [11]

Кратность ослабле- ния	Энергия γ -излучения, <i>Мэв</i>															
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2	3	4	6	10
2	1	2	3	4	5	7	8	10	11,5	13	17	20	21	20	16	13,5
5	2	4	6	9	11	15	19	22	25	28	38	43	46	45	38	30
10	3	5,5	9	13	16	21	26	30,5	35	38	51	59	65	64	55	42
30	3,5	7	11,5	17	23	30	35,5	43	49,5	55	73	85	93	92	80	63
100	5	10	16	23	30	38,5	47	55	63	70	96,5	113	122	121	109	87
500	6,5	14	22	31	40	51	61	72	82	92	129	150	163	161	149	119
10 ³	7	15	24	33	44	57	69,5	81	92	102	141	165	160	178	165	133
5·10 ³	9	19	30	42	55	70	85	99	112	124	170	198	219	217	203	166
10 ⁴	10,5	21	33	45,5	59	75	91	106	120	133	183	213	236	234	220	180
5·10 ⁴	11,5	23,5	37	52	69	87	105	123	140	156	214	247	263	272	258	215
10 ⁵	11,5	24	38	54	72	92	111	130	148	165	227	262	289	289	275	229

Таблица 44.11

Толщина защиты из железа. *см*, в зависимости от кратности ослабления и энергии γ -излучения (широкий пучок) [11]

Кратность ослабле- ния	Энергия γ -излучения, <i>Мэв</i>															
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2,0	3	4	5	10
2	0,7	1,2	1,7	2,2	2,5	2,7	2,9	3,1	3,2	3,3	3,6	3,9	4,4	4,5	4,6	3,4
5	1,4	2,5	3,4	4,1	4,8	5,1	5,5	5,7	6,1	6,4	7,4	8,1	8,9	9,4	9,6	8,0
10	1,9	3,5	4,6	5,6	6,3	6,8	7,3	7,7	8,1	8,5	10,0	11,0	12,2	12,6	13,2	11,4
30	2,4	4,5	6,2	7,5	8,5	9,2	9,8	10,4	10,9	11,4	13,6	15,1	17,0	17,7	18,8	17,0
100	3,4	6,1	8,1	9,6	10,8	11,7	12,5	13,2	13,9	14,5	17,3	19,5	22,1	23,3	25,0	23,1
500	4,4	7,7	10,1	12,0	13,7	14,9	16,0	17,0	17,9	18,7	22,3	25,0	28,8	30,6	32,7	31,2
1000	4,5	8,2	11,0	13,2	15,0	16,3	17,5	18,6	19,6	20,5	24,4	27,5	31,7	33,7	36,0	34,6
5·10 ³	5,6	10,1	13,4	15,8	17,7	19,3	20,7	22,0	23,2	24,3	29,4	33,3	38,2	40,7	43,2	42,2
10 ⁴	6,8	11,5	14,7	17,1	19,0	20,7	22,3	23,6	24,9	26,0	31,3	35,5	40,9	43,7	46,5	45,2
5·10 ⁴	8,6	13,8	17,0	19,6	21,8	23,6	25,2	26,9	28,4	29,9	35,9	40,8	47,2	50,4	55,0	53,0
10 ⁵	10,0	15,8	18,2	20,8	23,0	24,9	26,7	28,4	30,0	31,5	38,0	43,2	50,0	53,4	58,3	56,1
10 ⁶	12,8	17,9	21,4	24,2	26,7	28,9	31,2	33,3	35,2	37,0	44,7	50,6	58,8	63,3	69,0	67,0
10 ⁷	15,0	20,3	24,3	27,6	30,5	33,2	35,8	38,1	40,2	42,4	51,3	57,9	67,5	73,1	79,4	78,0

Толщина защиты из бетона, см, в зависимости от кратности ослабления и энергии γ -излучения (широкий пучок) [11]Для бетона $\rho=2.3 \text{ г/см}^3$.

Кратность ослабле- ния	Энергия γ -излучения, Мэв															
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2,0	3	4	6	10
2	4,7	7,6	9,9	11,3	12,3	12,4	12,4	12,6	12,7	12,9	13,6	14,1	15,3	16,4	18,8	18,8
5	5,6	11,0	15,5	18,8	21,1	21,8	22,3	22,6	23,0	23,5	25,8	28,2	32,9	35,2	38,7	39,9
10	8,2	14,6	19,7	23,7	25,8	26,8	27,6	28,4	29,1	29,9	34,0	37,6	43,4	47,5	51,6	54,0
30	8,5	16,4	22,8	27,7	32,9	34,8	36,4	37,8	39,2	40,5	46,5	51,6	59,9	65,7	71,6	78,1
100	11,5	21,1	28,9	35,2	39,9	43,0	45,3	47,2	48,8	50,5	58,3	65,7	77,5	84,5	95,1	105,1
500	13,8	24,6	35,2	43,9	50,5	54,5	57,3	58,8	62,5	64,6	74,8	84,5	101,0	110,4	124,4	139,7
1000	15,5	28,2	39,2	48,1	55,2	59,2	62,5	65,3	67,8	70,4	81,7	92,7	110,9	120,9	137,9	155,0
$5 \cdot 10^3$	18,8	33,1	45,6	56,4	65,7	70,0	74,0	77,0	80,2	82,8	97,4	110,9	132,7	146,8	166,7	186,7
10^4	18,8	35,2	48,5	60,3	69,3	74,7	79,1	82,9	85,2	89,2	104,5	118,6	143,2	156,7	179,0	201,3
$5 \cdot 10^4$	23,3	42,3	56,4	68,6	78,1	83,4	88,7	93,4	97,9	102,1	120,4	136,2	164,9	181,6	206,6	233,6
10^5	30,5	50,5	64,6	75,1	82,8	88,3	93,5	98,1	102,5	106,8	126,6	144,4	173,8	191,4	218,4	248,9
10^6	49,3	66,4	79,8	89,8	97,4	103,7	109,2	114,1	119,5	124,4	149,8	171,4	205,4	225,4	260,6	295,8
10^7	64,0	84,9	15,7	130,7	110,3	117,4	123,6	130,0	136,2	142,0	170,8	194,9	236,0	259,4	299,4	340,5

Таблица 44.13

Толщина защиты из воды, см, в зависимости от кратности ослабления и энергии γ -излучения (широкий пучок) [11]

Кратность ослабле- ния	Энергия γ -излучения, Мэв															
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2,0	3	4	6	10
2	18	27	30	30	29	28	27	27	26	26	28	33	37	38	40	45
5	27	37	42	44	46	46	47	47	48	48	53	59	69	74	85	98
10	35	47	52	55	57	58	60	61	62	63	71	79	92	101	116	135
30	45	58	65	69	73	75	77	79	81	82	96	107	124	140	163	192
100	53	70	79	84	88	92	95	98	101	104	120	136	160	182	212	253
500	66	85	96	104	110	116	120	124	128	132	153	173	206	234	277	334
1000	72	92	104	113	118	124	129	134	138	143	167	189	226	257	306	368
$5 \cdot 10^3$	81	105	120	130	138	147	154	160	165	170	198	225	271	309	368	446
10^4	91	114	128	139	147	155	162	168	175	181	212	241	290	331	396	480
$5 \cdot 10^4$	103	128	144	156	167	175	183	190	196	205	241	276	334	383	460	554
10^5	110	135	152	164	175	184	192	201	209	216	255	292	353	404	487	587
10^6	128	156	176	192	205	215	224	233	243	253	299	342	415	479	571	695
10^7	150	178	200	217	232	243	255	265	277	288	344	393	478	554	657	807

44.6. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ДОПУСТИМЫЕ УРОВНИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Единица поглощенной дозы излучения — рад — соответствует поглощению в 1 г облучаемого вещества 100 эрг энергии излучения.

Единицей экспозиционной дозы рентгеновского и γ -излучения служит рентген (р) — доза рентгеновского или γ -излучения в воздухе, производящая в 0,001293 г воздуха по 1 ед. СГСЭ ионов каждого знака. Для тех видов и энергий излучения, для которых на образование пары ионов в воздухе требуется 34 эв, 1 р соответствует поглощению 88 эрг в 1 г воздуха, т. е. 0,88 рад (γ -излучение и электроны при $E \leq 3 \text{ Мэв}$) (рис. 44.29). Для таких видов излучения, как осколки деления, приведенное выше соотношение между рентгеном и радом неприменимо.

Относительная биологическая эффективность различных видов излучения неодинакова. Коэффициент относительной биологической эффективности (ОБЭ) различных видов излучения характеризует степень био-

логического воздействия данного вида излучения по сравнению с γ -излучением при равенстве поглощенных доз.

За единицу ОБЭ принято биологическое действие рентгеновского излучения с энергией 200 кэв, создающего 100 пар ионов на 1 мкм пути в воде. ОБЭ различных биологических реакций может по-разному зависеть от линейной передачи энергии (ЛПЭ).

В связи с тем, что действие излучения на человеческий организм в целом является объектом количественного контроля, введено регламентированное значение ОБЭ для человеческого организма в целом [10, 15] — коэффициент качества излучения КК.

Степень облучения организма выражают в эквивалентных дозах D_3 , т. е. энергетическая доза облучения умножается на его коэффициент качества. Единицей измерения D_3 является 1 бэр — биологический эквивалент рада.

Естественное облучение человека за счет космической радиации и природных радиоактивных изотопов составляет 0,1 рад/год [12]. Доза профессионального облучения не должна превышать 0,1 бэр в неделю

(5 бэр в год) для персонала, непосредственно занятого с источниками излучений.

Для персонала, работающего в смежных помещениях и отдельных лиц из населения соответствующая доза составляет 0,5 бэр/год и для всего населения 5 бэр за 30 лет. Более подробно допустимые уровни внешнего и внутреннего облучения приведены в специальной литературе [10, 15].

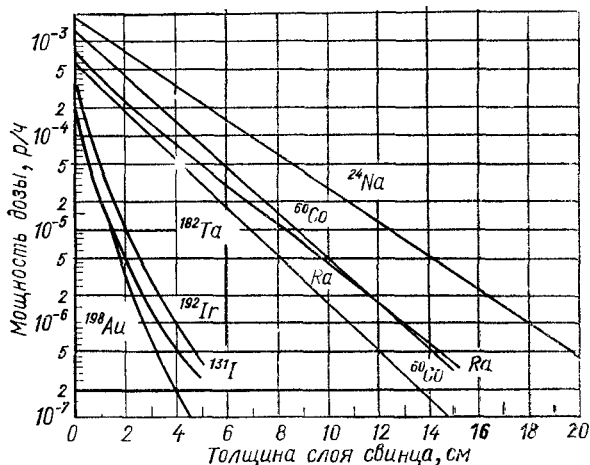


Рис. 44.29. Мощность дозы на расстоянии 1 м от различных источников γ -излучения интенсивностью 1 мкюри в зависимости от толщины свинцовой защиты [7].

Таблица 44.15

Коэффициенты качества различных видов ионизирующих излучений при хроническом облучении всего тела [15]

Вид излучения	КК	Вид излучения	КК
γ -Излучение	1	Нейтроны с энергией: 5 кэв	2,5
Рентгеновское излучение	1	20 кэв	5
Электроны и позитроны	1	500 кэв	8
α -Излучение ($E \leq Mэв$)	10	500 кэв	10
Протоны ($E \leq Mэв$)	10	1 Мэв	10,5
Тяжелые ядра отдачи	20	5 Мэв	7
Тепловые нейтроны	3	10 Мэв	6,5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспериментальная ядерная физика. Под ред. Э. Сегре. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1955.
2. Гринберг А. П. Методы ускорения заряженных частиц. М.—Л., Гостехиздат, 1950.
3. Barnett C. F., Gauster W. B., Ray J. A. Atomic and Molecular Collision Cross Sections. Oak Ridge Nat. Lab., ORNL-3113.
4. Прайс В. Регистрация ядерного излучения. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
5. Росси Б., Штауб Г. Ионизационные камеры и счетчики. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1951.
6. Handbuch der Physik, b 34. Springer-Verlag, Berlin, 1958.
7. Прайс В., Хортои К., Спинни К. Защита от ядерных излучений. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
8. Брегер А. Х. Источники ядерных излучений и их применение в радиационно-химических процессах. М., ВИНТИ, 1960.
9. Егер Р. Дозиметрия и защита от излучений. Пер. с нем. М., Госатомиздат, 1961.
10. Нормы радиационной безопасности НРБ—69. Изд. 2-е. М., Атомиздат, 1972.
11. Аглинцев К. К., Кодюков В. М. Прикладная дозиметрия. М., Госатомиздат, 1962.
12. Гусев Н. Г., Ковалев Е. Е., Осаиов Д. П. Защита от ионизирующих излучений. М., Атомиздат, 1969.
13. Защита от ионизирующих излучений. Т. 2. М., Атомиздат, 1973.
14. Горшков Г. В. Проникающие излучения радиоактивных источников. Л., «Наука», 1967.
15. Моисеев А. А., Иванов В. И. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене. М., Атомиздат, 1974.

Таблица 44.14

Коэффициент качества КК для излучений с различными значениями ЛПЭ [15]

ЛПЭ в воде, кэв/мкм	КК	ЛПЭ в воде, кэв/мкм	КК
3,5	1	23—53	5—10
3,5—7,0	1—2	53—175	10—20
7,0—23	2—5		

ГЛАВА 45

КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

45.1. ВВЕДЕНИЕ

К первичному космическому излучению принято относить заряженные и нейтральные частицы, входящие в верхние слои атмосферы Земли. Вступая во взаимодей-

ствие с ядрами атомов атмосферы, первичное космическое излучение может породить большое разнообразие новых элементарных частиц. Ядерно-активные частицы вызывают в атмосфере Земли смешанные электронно-ядерные ливни, состоящие из мезонов, нуклонов и

электронно-фотонной компоненты. Ливни электромагнитного происхождения (электронно-фотонные ливни) образуют мягкую (быстро поглощаемую веществом) компоненту космического излучения. Электронно-ядерные ливни вызываемые космическими частицами очень больших энергий, носят название широких атмосферных ливней (на уровне моря их поперечные размеры могут достигать нескольких километров). Полное количество энергии, заключенное в космическом излучении в галактическом пространстве, по порядку величины сравнимо с другими формами энергии во Вселенной.

Плотность различных форм энергий в Галактике [1]

Форма энергии	Плотность энергии, эв/см³
Космическое излучение	1
Свет звезд	1
Магнитная энергия	1
Турбулентное движение галактического газа	10—100
Вращение Галактики	1000
Энергия массы покоя в Галактике	10⁹

Некоторые характеристики космического излучения [2]

Общее число частиц и γ-квантов, проходящих в атмосферу Земли	8 · 10¹⁷ сек⁻¹
Общая энергия космического излучения, входящего в верхние слои атмосферы	9 · 10¹⁸ Гэв/сек = 1,4 · 10⁹ вт
Сила тока, создаваемая частицами, если бы они все несли положительный заряд	0,13 а
Количество пар ионов, образуемых космическим излучением на уровне моря (в среднем)	1,63 пара ионов/(см² · сек)
Общая энергия космического излучения, достигающего поверхности Земли	40 вт

45.2. ПЕРВИЧНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ
Состав

Таблица 45.1
Распространенность элементов в космическом излучении [1]

Ядра*	Z	Первичное космическое излучение		Распространенность во Вселенной на 10⁵ атомов водорода
		Число ядер на 10⁵ протонов	Содержание (к числу первичных частиц), %	
Протоны	1	100 000	93,0	100 000
α-Частицы	2	6 800	6,3	7 700
L-группа ядер	3—5	150	0,14	6 · 10⁻⁴
M-группа ядер	6—9	440	0,4	150
H-группа ядер	≥ 10	150	0,14	30
Железо	26	15	0,014	1,5
Другие ядра	≥ 30	< 1	0,001	10⁻³

* Содержание электронов и фотонов в первичном космическом излучении не превышает 1 и 0,1% соответственно [1].

Таблица 45.2
Относительная распространенность элементов внутри групп ядер L, M и H (+ подгруппа VH) космического излучения [4]

L		M		H		VH	
Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %
Li	23	C	44	Ne	21,4	Ca	4,7
Be	10	N	21	Na	13,4	Sc	0,8
B	67	O	31	Mg	23,2	Ti	3,0
		F	4	Al	4,5	V	0,8
				Si	8,0	Cr	5,0
				P	0,9	Mn	0
				S	0	Fe	9,9
				Cl	0,7	Co	0
				Ar	2,4	Ni	1,3
				K	0		

Таблица 45.3
Ядерный состав солнечного и галактического космического излучения [1]

Ядра	Z	Солнечное космическое излучение	Галактическое космическое излучение
He	2	107 ± 14	48
Be, B	4; 5	≤ 0,02	0,8
C	6	0,59 ± 0,07	1,8
N	7	0,19 ± 0,04	≤ 0,8
O	8	1,0	1,0
F	9	≤ 0,03	0,1
Ne	10	0,13 ± 0,02	0,30
Mg	12	0,043 ± 0,011	0,32
Si	14	0,033 ± 0,011	0,12
P—Sc	15—21	0,057 ± 0,017	0,13
Ti—Ni	22—28	≤ 0,02	0,28

* За единицу принято содержание атомов кислорода (Z = 8).

Плотность частиц, в солнечном ветре 1—9 см⁻³
в космическом излучении около Земли 10⁻¹⁰ см⁻³ [3]

Таблица 45.4
Плотность потока космических частиц [3]
n — число частиц, падающих на границе земной атмосферы, на 1 м² в единице телесного угла в 1 сек

Компонента	Z	n, м⁻² сек⁻¹
Протоны	1	1300
α-Частицы	2	94
L-группа ядер	3—5	2,0
M-группа ядер	6—9	6,7
H-группа ядер	≥ 10	2,0
Подгруппа ядер VH	≥ 20	0,5
Фотоны с Eγ > 50 Мэв	0	5 [1]

Энергетический спектр

В широком интервале энергий ($2 \cdot 10^9$ — 10^{15} эв/нуклон) наблюдается плавное убывание интенсивности космического излучения с увеличением энергии частиц:

$$I_A(>E) = K_A E^{-(\gamma-1)};$$

здесь $I_A(>E)$ — интенсивность потока ядер группы A , частица/(м²·сек·стер), энергии которых больше, чем E , Гэв/нуклон; K_A — некоторый постоянный коэффициент. В области меньших энергий показатель энергетического спектра γ зависит от солнечной активности, поскольку в космическом излучении солнечного происхождения преобладают частицы малых энергий.

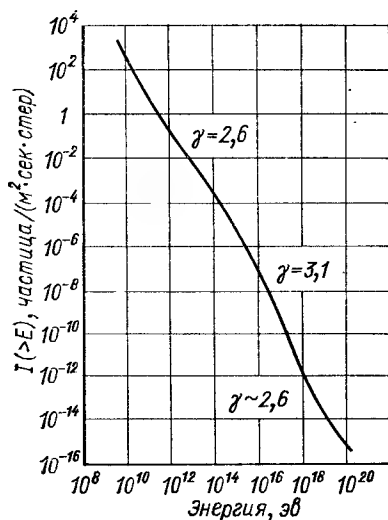


Рис. 45.1. Полная интенсивность $I(>E)$ всех групп ядер космического излучения [3].

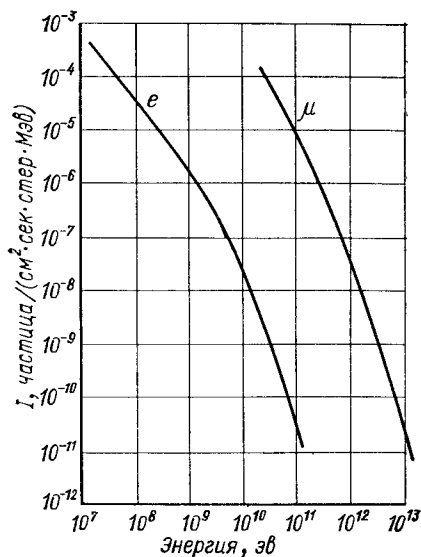


Рис. 45.2. Форма энергетического спектра электронной [3] и мюонной [13] компонент космического излучения.

45.3. ВТОРИЧНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Высотный ход интенсивности космического излучения

При углублении в атмосферу Земли меняется как состав, так и интенсивность космического излучения. На больших высотах основную роль играют процессы генерации ливней. В дальнейшем, с уменьшением энергии вторичных частиц, ядерно-каскадные процессы затухают и общая интенсивность космического излучения начинает падать вследствие ионизационного торможения и поглощения медленных частиц.

Поток нейтронов на уровне моря [6]:

$$I_n = \begin{cases} (2,3 \pm 0,6) \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}; & E_n < 0,4 \text{ эв;} \\ (4,2 \pm 1,0) \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}, & E_n > 0,4 \text{ эв.} \end{cases}$$

Таблица 45.5

Интенсивность отдельных групп космического излучения [4]

Группа ядер	Интервал энергий, Гэв/нуклон	$\gamma - 1$	K_A
Протоны	4,7—16,0	$1,40 \pm 0,10$	4800
α -Частицы	2,5—800	$1,49 \pm 0,22$	360
α -Частицы	2,5—8,0	$1,45 \pm 0,11$	300
α -Частицы	1,3—8,0	1,5	415
α -Частицы	1,4—4,0	$1,48 \pm 0,12$	360
Группа M	2,5—8,0	$1,57 \pm 0,12$	$25,4 \pm 4,2$
Группа M	2,5—8,0	$1,6 \pm 0,15$	$26,0 \pm 2,2$
Группа H	2,5—8,0	$1,60 \pm 0,15$	$11,9 \pm 2,0$

Таблица 45.6

Соотношение числа заряженных C- и нейтральных N-частиц космического излучения в зависимости от высоты над поверхностью Земли [5]

Глубина атмосферы, г/см²	Энергия, Гэв	N/C
5—50	~1000	$0,083 \pm 0,03$
610	200—2000	$0,74 \pm 0,08$
670	~10	$0,77 \pm 0,035$
700	200—1000	$0,57 \pm 0,10$
710	200—2000	$0,65 \pm 0,007$
780	200—2000	$0,56 \pm 0,11$
800	~60	$0,40 \pm 0,12$
800	20—40	$0,66 \pm 0,11$
1000	~27	$0,64 \pm 0,08$

Геомагнитные явления

Вследствие влияния магнитного поля Земли ее поверхности могут достигать лишь те частицы космического излучения, магнитная жесткость которых $\xi = A \cdot p / (Z \cdot e)$ больше некоторой величины, являющейся функцией географических координат и направления движения частицы (A — массовое число ядра; Z — его заряд; p — импульс частицы; e — заряд электрона). Широтный эффект составляет $\sim 10\%$ на уровне моря и резко возрастает при удалении от поверхности Земли.

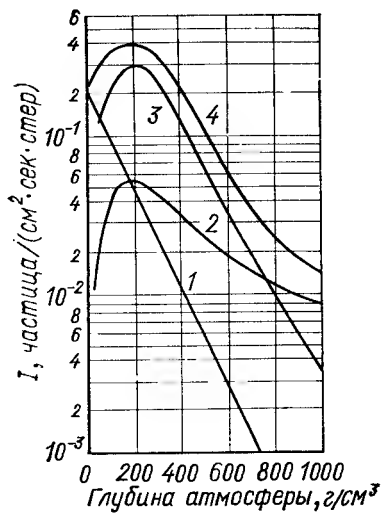


Рис. 45.3. Высотный ход интенсивности I различных компонент космического излучения для 50° с. ш. [10]: 1 — нуклонная; 2 — мюонная и 3 — электронная компоненты; 4 — полная интенсивность.

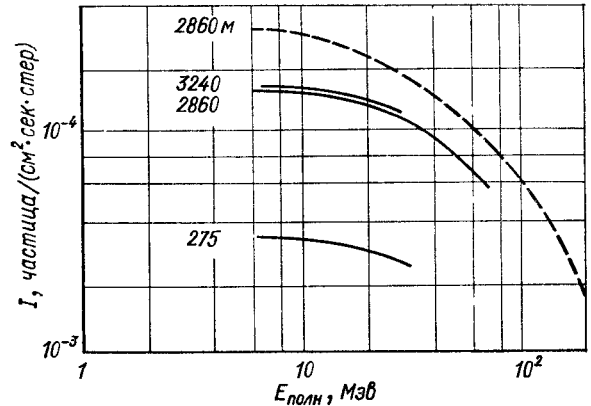
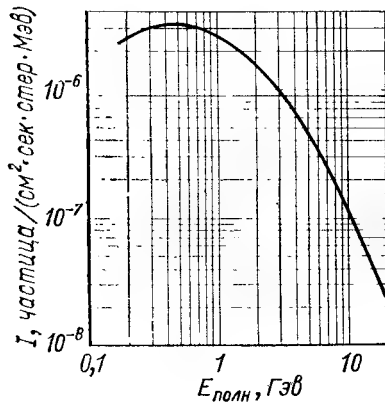


Рис. 45.5. Интегральные энергетические спектры электронов (сплошные кривые) и фотонов (штриховая кривая) в нижних слоях атмосферы [10].

Рис. 45.4. Дифференциальный энергетический спектр μ -мезонов на уровне моря для 50° с. ш. [10].

Таблица 45.7

Характеристика космического излучения, входящего в атмосферу на различных широтах [2]

Характеристика излучения	Геомагнитная широта		
	3°	39°	52°
Энергия излучения, падающего на 1 см^2 атмосферы в 1 сек, эв	$1 \cdot 10^9$	$1,7 \cdot 10^9$	$3,2 \cdot 10^9$
Общее число ионов, образуемых в 1 сек в столбе атмосферы площадью 1 см^2	$3 \cdot 10^7$	$5,4 \cdot 10^7$	$7,4 \cdot 10^7$
Нижний предел энергии частиц, достигающих Земли, устанавливаемый магнитным полем Земли, эв	$1,5 \cdot 10^{10}$	$8 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^9$
Средняя энергия частиц, пробивающих атмосферу, эв	$3 \cdot 10^{10}$	$1,6 \cdot 10^{10}$	$0,88 \cdot 10^{10}$
Вероятное число частиц, падающих на 1 см^2 внешней поверхности атмосферы в минуту	1,9	6,5	21,8

Зависимость магнитной жесткости, Гэв, для вертикально падающих частиц от географических координат [5]

Географическая широта, град	Восточная долгота, град								
	0	20	40	60	80	100	120	140	160
Северная									
70	0,274	0,376	0,453	0,505	0,54	0,55	0,56	0,57	0,512
60	1,12	1,28	1,42	1,54	1,70	1,82	1,87	1,90	1,76
50	3,06	3,60	3,81	3,77	3,84	3,98	4,15	4,26	4,37
40	6,7	7,20	7,60	7,80	8,2	9,4	9,6	9,0	8,5
30	11,2	11,6	12,6	13,5	14,3	14,5	14,5	13,9	13,1
20	14,4	14,9	15,5	16,1	16,5	16,8	16,4	16,0	14,8
10	15,1	15,6	16,4	17,0	17,6	17,7	17,1	16,5	16,0
Южная									
0	14,4	14,9	15,7	16,3	16,8	17,2	17,0	16,5	16,2
10	12,5	12,4	13,4	14,4	14,9	15,0	15,1	15,2	15,2
20	10,5	10,2	10,7	10,5	10,8	10,9	10,5	11,1	12,1
30	8,9	7,9	6,8	5,9	5,1	4,62	4,70	5,2	6,2
40	6,3	4,59	3,77	3,18	2,48	2,03	1,98	2,28	3,0
50	3,76	2,65	1,81	1,34	0,90	0,63	0,55	0,63	1,0
60	1,90	1,24	0,77	0,512	0,281	0,136	0,096	0,086	0,19
70	0,82	0,512	0,294	0,136	0,055	0,014	0,003	0,002	0,26
Географическая широта, град	Западная долгота, град								
	20	40	60	80	100	120	140	160	180
Северная									
70	0,151	0,06	0,018	0,082	0,152	0,056	0,161	0,288	0,421
60	0,72	0,365	0,181	0,125	0,174	0,381	0,75	1,20	1,55
50	2,24	1,28	0,73	0,63	0,85	1,44	2,23	3,22	4,09
40	4,94	3,01	2,06	1,97	2,52	3,83	4,99	6,2	7,7
30	8,8	5,8	4,48	4,45	5,6	7,3	8,9	10,4	12,3
20	12,8	10,1	8,5	8,3	9,8	12,0	13,2	13,7	14,2
10	14,6	13,6	12,4	11,8	13,3	14,5	14,7	15,0	15,4
Южная									
0	12,2	14,1	13,6	13,5	14,6	15,1	15,4	15,6	15,9
10	13,1	13,4	13,6	14,0	14,6	14,8	14,8	15,2	15,3
20	11,4	12,2	12,8	13,6	14,0	14,0	13,8	13,3	12,6
30	9,9	11,1	11,6	12,6	13,1	12,6	11,7	9,5	7,7
40	8,0	9,3	10,2	10,4	9,7	8,3	6,7	5,2	4,03
50	5,1	6,7	7,3	6,8	5,6	4,50	3,4	2,3	1,45
60	2,81	3,85	4,15	3,9	3,05	2,19	1,42	0,82	0,458
70	1,24	1,61	1,69	1,57	1,27	0,85	0,512	0,27	0,11

Таблица 45.9

Ионизация атмосферы под действием космического излучения на уровне моря [7]

Геомагнитная широта, град	Число пар ионов, см ⁻³ ·сек ⁻¹	Геомагнитная широта, град	Число пар ионов, см ⁻³ ·сек ⁻¹
0	1,61	50	1,84
10	1,61	60	1,84
20	1,63	70	1,84
30	1,68	80	1,84
40	1,77	90	1,84

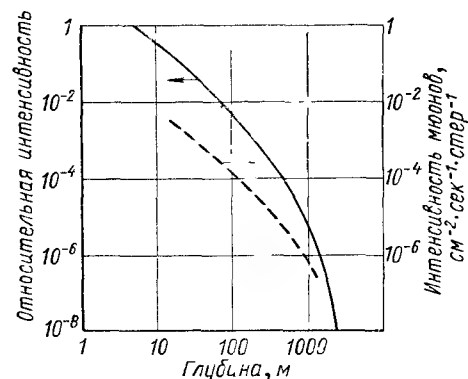


Рис. 45.6. Зависимость интенсивности космического излучения от глубины проникновения в Землю [12] и поглощения мюонов в воде [13] (штриховая линия).

Значения радиационной единицы длины t_0 и критических энергий ϵ для различных веществ [8]

Вещество	t_0 , г/см ²	ϵ , Мэв	
		без учета эффекта плот- ности	с учетом эффекта плотности
H	62,8	350	—
He	93,1	250	—
Li	83,3	180	138
Be	66,0	141	110
B	53,6	115	91
C	43,3	97	77
N	38,6	85	—
O	34,6	75	—
F	33,4	67,5	—
Na	28,2	55,5	46,5
Al	24,3	47	40
Si	22,2	44	37,5
Cl	19,5	36	—
Ar	19,7	34	—
K	17,4	31,7	27,8
Ca	16,3	30,4	26,7
Fe	13,9	23,3	20,7
Cu	13,0	20,9	18,8
Br	11,5	17,2	15,7
Ag	9,0	12,7	11,9
J	8,5	11,3	10,7
Xe	8,5	11,0	—
W	6,8	8,3	8,1
Pb	6,4	7,5	7,4
LiH (гидрид лития)	80	207	157
C ₃ H ₈ (пропан)	45,9	129	—
C ₈ H ₈ (полистирол)	44,4	110	88
Воздух	37,1	81	—
Вода	36,4	90	73
Al ₂ SO ₃ ·2SiO ₂ ·2H ₂ O (глина)	28,8	60,9	50,6
SiO ₂ (кварц)	27,4	56,2	47,3
CaCO ₃ (известняк)	24,2	51,2	43,4
NaCl (соль)	22,2	42,1	36,2
Ядерная эмульсия НИКФИ-Р	11,4	17,8	16,4

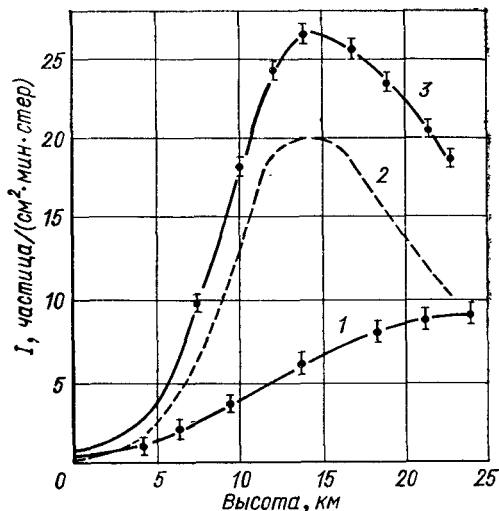
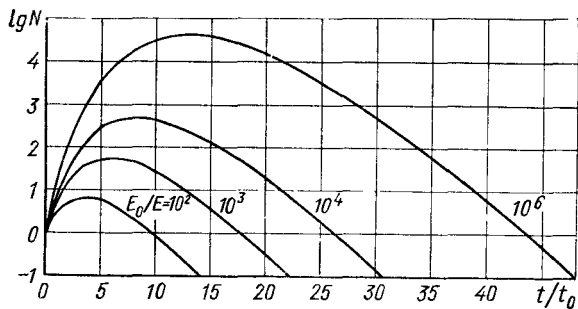


Рис. 45.7. Высотный ход интенсивности жесткой (1), мягкой (2) и всей ионизирующей (3) компонент космического излучения для 51° с. ш. [10].

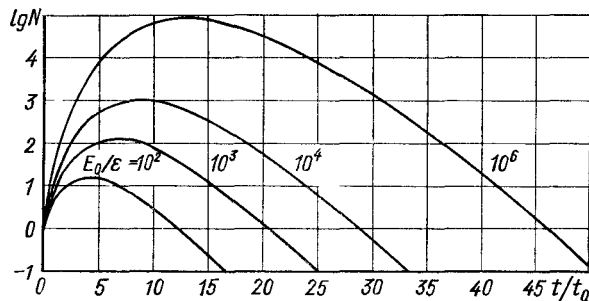
Электронно-фотонные каскадные ливни

Радиационные единицы длины и критические энергии. Проходя через вещество, быстрые электроны теряют энергию главным образом в процессах радиационного излучения и образования пар. Спектральная плотность потерь энергии на излучение на единице пути практически не зависит от энергии электронов. Расстояние, на котором энергия электрона уменьшается в « ϵ » раз, представляет собой удобную масштабную единицу длины пробега быстрых электронов и носит название радиационной, или лавинной единицы длины t_0 . Критическую энергию ϵ определяют обычно как среднюю величину потерь энергии электроном на ионизацию на t_0 -единице длины [8].

Каскадные кривые

Рис. 45.8. Число электронов $N(E, E, t)$ с энергией, большей, чем E , в ливне, образованном электроном с энергией E_0 , как функция расстояния t , выраженного в t_0 -единицах [11].

Результаты расчета по одномерной каскадной теории в приближении А, когда для процессов образования пар и тормозного излучения используются асимптотические формулы, а столкновениями электронов пренебрегают. Это приближение справедливо для любых веществ и для энергий электронов, больших по сравнению с критической энергией ϵ для выбранного вещества.

Рис. 45.9. Полное число электронов $N(E_0, 0, t)$ в ливне, образованном электроном с энергией E_0 , как функция расстояния t , выраженного в t_0 -единицах [11].

Результаты расчета по одномерной теории в приближении Б, при котором учитываются также и ионизационные потери электронов. Пробеги электронов выражены в радиационных единицах t_0 , а энергии частиц даны в единицах критической энергии ϵ .

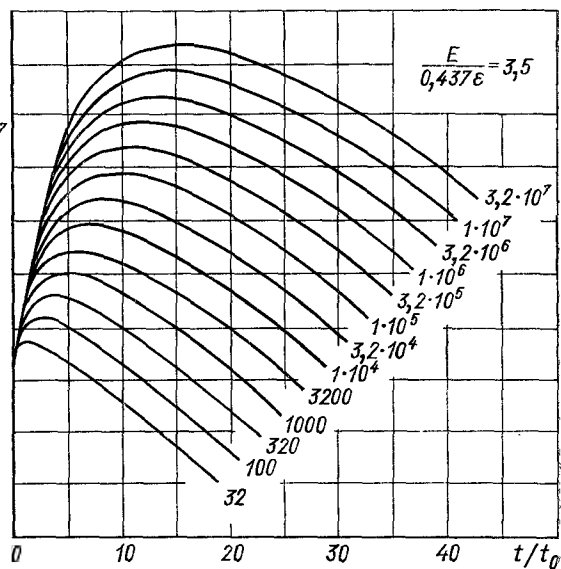
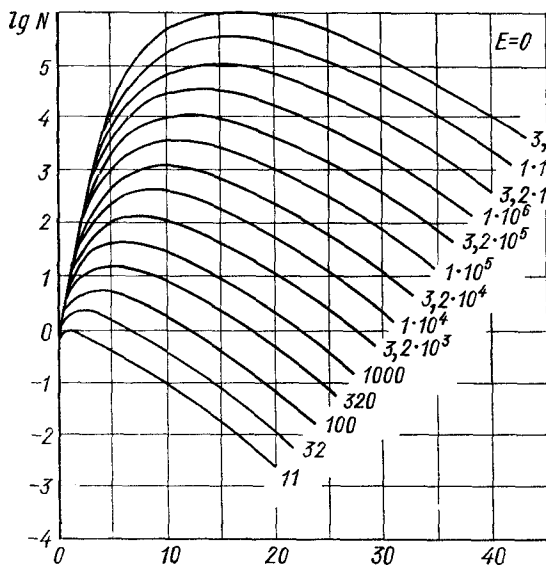


Рис. 45.10. Число электронов $N(E_0, E, t)$ с энергией, большей E , в ливне, образованном электроном с энергией E_0 , как функция расстояния t , выраженного в t_0 -единицах. На кривых указаны значения отношения $E_0/(0,437\epsilon)$. Вычисления проведены методом моментов для свинца с учетом ионизационных потерь и многократного рассеяния электронов [9].

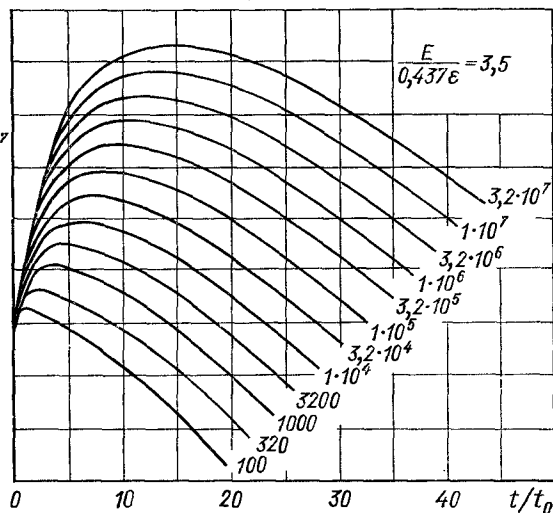
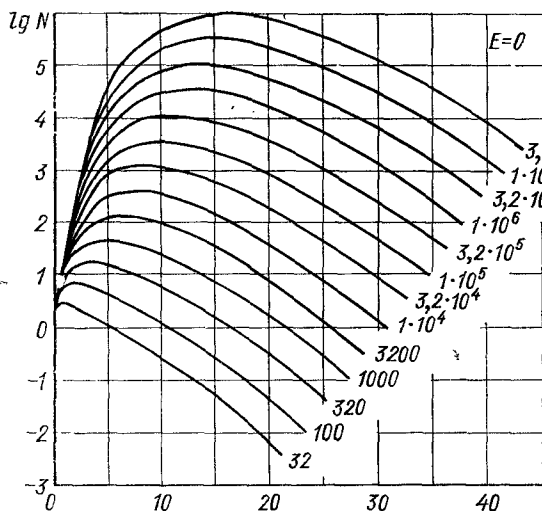


Рис. 45.11. Число электронов $N(E_0, E, t)$ с энергией больше E в ливне, образованном γ -квантом с энергией E_0 , как функция расстояния t , выраженного в t_0 -единицах. На кривых указаны значения отношения $E_0/(0,437\epsilon)$. Вычисления проведены методом моментов для свинца с учетом ионизационных потерь и многократного рассеяния электронов [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рамакришнан А. Элементарные частицы и космические лучи. Пер. с англ. М., «Мир», 1965.
2. Проблемы радиационной гигиены. Пер. с англ. и нем. Под ред. Ф. Г. Кроткова. М., Медгиз, 1963.
3. Гинзбург В. Л. «Природа», 1968, т. 7, с. 2.
4. Гинзбург В. Л., Сыроватский С. И. Происхождение космических лучей. М., Изд-во АН СССР, 1963.
5. Мурзин В. С., Сарычева Л. И. Космические лучи и их взаимодействия. М., Атомиздат, 1968.
6. Воелла J. e. a. «Nuovo cimento», 1963, v. 29, p. 103.
7. Аллен К. У. Астрофизические величины. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
8. Довженко О. И., Поманский А. А. В сб.: Труды физ. ин-та им. П. Н. Лебедева. Т. 26. М., «Наука», 1964, с. 167.
9. Иваненко И. П., Самосудов Б. Е. «Ядерная физика», 1967, т. 5, с. 622.
10. Физика космических лучей. Т. 3. Под ред. Дж. Вильсона. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1958.
11. Росси Б. Частицы больших энергий. Пер. с англ. М., ГИТТЛ, 1955.
12. Добротин П. А. Космические лучи. М., Изд-во АН СССР, 1963.
13. Хаякава С. Физика космических лучей. Часть I. Пер. с англ. М., «Мир», 1973.

VII. АСТРОНОМИЯ И ГЕОФИЗИКА

ГЛАВА 46

АСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА

46.1. НЕКОТОРЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Астрономическая единица длины (*а. е.*) — среднее расстояние от Земли до Солнца, 1 *а. е.* = $(1,4960 \pm 0,0003) 10^{11}$ м [1]

Парсек, 1 *пс* = $(3,0856 \pm 0,0001) 10^{16}$ м [1]

Световой год, 1 *св. год* = $9,4605 \cdot 10^{15}$ м [1]

Время, за которое свет проходит расстояние в 1 *а. е.* равно 498,99 *сек* [1].

Астрономические символы

☉ Солнце	♁, ⊕ Земля	♅ Уран
☾ Луна	♂ Марс	♆ Нептун
☿ Меркурий	♃ Юпитер	♇ Плутон
♀ Венера	♄ Сатурн	☄ Комета
♈ Овен 0°	♌ Лев 120°	♐ Стрелец 240°
♉ Телец 30°	♍ Дева 150°	♑ Козерог 270°
♊ Близнецы 60°	♎ Весы 180°	♒ Водолей 300°
♋ Рак 90°	♏ Скорпион 210°	♐ Рыбы 330°

46.2. СОЛНЦЕ

Характеристики Солнца [1—3]

Радиус Солнца	$R_{\odot} = (6,9598 \pm 0,0007) 10^{10}$ см
Масса	$M_{\odot} = (1,989 \pm 0,002) 10^{33}$ г
Средняя плотность	$\rho_{\odot} = 1,410$ г/см ³
Период сидерического вращения (на широте $\varphi = 16^\circ$)	25, 38 суток
Синодический период	27,275 суток
Кинетическая энергия вращения	$1,9 \cdot 10^{42}$ эрг
Наклон экватора к плоскости эклиптики	$7^\circ 15'$
Скорость освобождения на поверхности	$6,177 \cdot 10^7$ см/сек
Работа, необходимая для рассеяния солнечного вещества в пространство	$7,4 \cdot 10^{48}$ эрг
Ускорение силы тяжести на поверхности	(27398 ± 4) см/сек ²
Средний экваториальный горизонтальный параллакс	$8,794'' \pm 0,002''$

Угловой диаметр Солнца:
в перигелии $32'31''$
в афелии $31'27''$
Диск Солнца — круг с погрешностью $\pm 0'', 01$

Положение в Галактике [1, 2, 4]

Расстояние от галактического центра $(8,2 \pm 0,8) 10^3$ *пс*
Расстояние от галактической плоскости (8 ± 12) *пс*
Период вращения вокруг галактического центра, галактический год . $2,2 \cdot 10^8$ лет
Скорость вращения вокруг галактического центра 220 км/сек
Скорость движения относительно ближайших звезд $(20 \pm 0,5)$ км/сек

Солнце как звезда [2]

Звездная величина	Видимая	Абсолютная
Визуальная	$m_{\text{виз}} = V = -26,78$	$M_{\text{виз}} = \pm 4,79$
Фотографическая (синяя)	$B = -26,16$	$M_B = +5,41$
Ультрафиолетовая	$U = -26,06$	$M_U = +5,51$
Болометрическая	$m_{\text{бол}} = -26,85$	$M_{\text{бол}} = +4,72$
Показатель цвета	$B-V = +0,62$	
Спектральный класс	$G 2V$	
Эффективная температура	$T_{\text{эф}} = (5800 \pm 15)^\circ \text{K}$	
Температура в центре Солнца в зависимости от принятых моделей и содержания элементов внутри Солнца колеблется от 11 до 46 миллионов градусов [5, 6].		
Наиболее вероятные значения температуры, плотности и давления в центре:		

$$T_c = (13,6 \pm 1,2) 10^6 \text{K};$$

$$\rho_c = (98 \pm 15) \text{ г/см}^3;$$

$$P_c = 2,0 \cdot 10^{12} \text{дин/см}^2 = 2,0 \cdot 10^{11} \text{атм}$$

Содержание химических элементов в атмосфере
Солища [3. 7]

Приведены логарифмы чисел атомов, содержащихся в столбе солнечной атмосферы площадью 1 см^2 .
Единицей величины является 10^{12} атомов над 1 см^2 солнечной атмосферы.

Элемент	$\lg N$	Элемент	$\lg N$	Элемент	$\lg N$
H	12,0	Sc	2,82	Zr	2,23
He	11,7	Ti	4,68	Nb	1,95
Li	0,96	V	3,70	Mo	1,90
Be	2,36	Cr	5,36	Ru	1,43
C	8,72	Mn	4,90	Rh	0,78
N	7,98	Fe	6,57	Pd	1,21
O	8,96	Co	4,64	Ag	0,14
Na	6,30	Ni	5,91	Cd	1,46
Mg	7,40	Cu	5,04	In	1,16
Al	6,20	Zn	4,40	Sn	1,54
Si	7,50	Ga	2,36	Sb	1,94
P	5,34	Ge	3,29	Вa	2,10
S	7,30	Rb	2,48	Yb	1,53
K	4,70	Sr	2,60	Hg	3,38
Ca	6,15	Y	2,25	Pb	1,33

Полное излучение Солнца $L_{\odot} = (3,90 \pm 0,04) \cdot 10^{33} \text{ эрг/сек} = 3,90 \cdot 10^{20} \text{ Вт}$

Поток излучения фотосферы $6,41 \cdot 10^{10} \text{ эрг/(см}^2 \cdot \text{сек)} = 6,41 \text{ квт/см}^2$

Солнечная постоянная равна полному количеству излучения, падающего на площадку в 1 см^2 , помещенную под прямым углом к солнечным лучам за пределами земной атмосферы на среднем расстоянии от Солнца до Земли.

Солнечная постоянная $\dots (1,99 \pm 0,02) \text{ кал/(см}^2 \cdot \text{мин)} = 1,388 \cdot 10^8 \text{ эрг/(см}^2 \cdot \text{мин)}$

Эффективная температура Солнца $T_{\text{эф}} \dots 5800 \pm 15^\circ \text{K}$

Средняя яркость поверхности солнечного диска за пределами земной атмосферы $2,02 \cdot 10^5 \text{ св} = 6,33 \cdot 10^5 \text{ лам-берт}$

Освещенность, создаваемая Солнцем на расстоянии в $1 \text{ а. е.} \dots 13,7 \text{ ф} = 137 \text{ 000 лк}$
Сила света Солнца $\dots 3,07 \cdot 10^{27} \text{ св}$

Радиоизлучение

Согласно классификации [1, 2, 8, 9], различают, по крайней мере, пять типов радиоизлучения Солнца:

- 1) спокойные тепловые шумы;
- 2) медленно меняющиеся шумы солнечных пятен;
- 3) шумовые бури, состоящие из коротких выбросов (ассоциируются с солнечными пятнами);
- 4) выбросы, связанные с солнечными вспышками;
- 5) изолированные неполяризованные выбросы.

В период максимума солнечных пятен шумовые бури наблюдаются около 10 раз в год. Число типичных выбросов в годы максимума пятен около 100 за год. Продолжительность выброса примерно 10 мин.

Поток энергии радиоизлучения Солнца F_{ν} измеряется в ваттах и относится к единичному интервалу частот и площади 1 м^2 земной поверхности. Поток F_{ν} связан с эффективной температурой $T_{\text{эф}}$, которая равна температуре абсолютно черного тела, излучающего в радиодиапазоне столько же энергии, сколько и Солнце. $F_{\nu} = 2,089 \cdot 10^{-44} T_{\text{эф}}^{\nu^2}$, где $[F_{\nu}] = [\text{вт/(м}^2 \cdot \text{Гц)}]$; $T_{\text{эф}}$ — в градусах Кельвина и частота ν — в герцах.

Таблица 46.2

Характеристики радиоизлучения Солища [2]

Длина волны λ , см	Частота ν , МГц	F_{ν} , $10^{-22} \text{ вт/(м}^2 \cdot \text{Гц)}$				
		Спокойное Солнце		Медленно меняющиеся излучения пятен	Типичные	
		максимум пятен	минимум пятен		шумовая буря	выброс
600	50	0,49	0,36	0,0	70	500
300	100	2,3	1,8	0,0	100	500
150	200	9,4	6,9	0,2	70	400
60	500	29	18	7	5	300
30	10^3	44	27	20	0	200
15	$2 \cdot 10^3$	69	49	48	—	100
6	$5 \cdot 10^3$	155	115	52	—	50
3	10^4	340	260	45	—	20
1,5	$2 \cdot 10^4$	820	730	—	—	—
0,6	$5 \cdot 10^4$	3400	3400	—	—	—

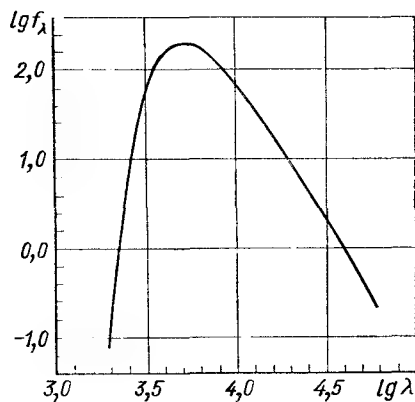


Рис. 46.1. Спектр солнечного излучения [1]:
 f_{λ} — поток солнечной энергии через единичную площадку на расстоянии в 1 а. е. от Солнца, отнесенный к единичному интервалу длин волн, $\text{эрг/(м}^2 \cdot \text{Å} \cdot \text{сек)}$; λ — длина волны, Å .

Солнечные пятна

Диаметры пятен колеблются от 2000 до 10^5 км [3].
Время существования пятен меняется от 3—4 ч до 10—15 месяцев [3].

Средняя продолжительность пятнообразовательного цикла 11,04 года [2].

Отношение интенсивности полного излучения пятна к интенсивности прилегающей фотосферы [2]: *тень/фотосфера* $\sim 0,27$, *полутень/фотосфера* $\sim 0,78$.

Эффективные температуры большого пятна [2]:

тень, $T_{\text{эф}} \approx 4400^\circ\text{K}$; полутень, $T_{\text{эф}} \approx 5700^\circ\text{K}$.

Изменение диаметра Солнца в течение одиннадцатилетнего периода [1] равно $\pm 0'',09$; увеличение происходит в годы максимума пятен, уменьшение — в годы минимума. Напряженность магнитного поля пятна связана с его размерами [1]: $H \approx 540 \sqrt{d}$, здесь H в гауссах; d — диаметр пятна в тысячах километров.

46.3. ПЛАНЕТЫ И СПУТНИКИ [1]

Масса Земли	$M_{\oplus} = 5,977 \cdot 10^{27} \text{ г}$
Общая масса:	
планет	$147,9 M_{\oplus}$
спутников	$0,12 M_{\oplus}$
малых планет	$3 \cdot 10^{-4} M$
метеорной материи	$5 \cdot 10^{-10} M_{\oplus}$
планетной системы	$448 M_{\oplus} = 2,678 \cdot 10^{30} \text{ г}$
Полный угловой момент планетной системы	$3,15 \cdot 10^{50} \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{сек}$

Таблица 46.3

Орбиты планет [1]

Планета	Большая полуось орбиты млн. км	Период, сутки		Средняя орбитальная скорость, км/сек	Эксцентриситет орбиты	Наклонение к эклиптике (на 1970 г.)
		сидерический	синодический			
Меркурий	57,91	87,969	115,88	47,90	0,2056	$7^\circ 00' 15''$
Венера	108,21	224,701	583,92	35,05	0,006818	$3^\circ 23' 40''$
Земля	149,60	365,256	—	29,80	0,01675	—
Марс	227,9	686,98	779,94	24,14	0,09331	$1^\circ 51' 00''$
Юпитер	778,3	4332,6	398,88	13,06	0,04833	$1^\circ 18' 17''$
Сатурн	1428	10759,2	378,09	9,65	0,05589	$2^\circ 29' 25''$
Уран	2872	30687	369,66	6,80	0,0470	$0^\circ 46' 22''$
Нептун	4498	60184	367,49	5,43	0,0087	$1^\circ 46' 21''$
Плутон	5910	90700	366,74	4,74	0,247	$17^\circ 08' 30''$

Таблица 46.4

Физические характеристики планет [1]

Объем Земли $V_{\oplus} = 1,08332 \cdot 10^{27} \text{ см}^3$; масса Земли $M_{\oplus} = (5,977 \pm 0,004) \cdot 10^{27} \text{ г}$; ρ — средняя плотность; g — ускорение силы тяжести на поверхности планеты; $g_{\text{центр}}$ — экваториальное центробежное ускорение; $v_{\text{осв}}$ — скорость освобождения; φ — наклонение экватора к плоскости орбиты

Планета	Экваториальный радиус, км	Сжатие	Объем $V_{\oplus}=1$	Масса $M_{\oplus}=1$	ρ , г/см ³	g , см/сек ²	$g_{\text{центр}}$, см/сек ²	$v_{\text{осв}}$ [14], км/сек	Период вращения	φ
Меркурий	2420	0,0	0,055	0,053	5,3	360	—0,00	4,15	58,7 дня [28]	7° [11]
Венера	6200	0,0	0,91	0,815	4,95	850	—0,00	10,25	242,98 дня* [20]	$< 3^\circ$ [28]
Земля	6378,39	0,00336	1,000	1,000	5,517	980,66	—3,392	11,19	23 ч 56 мин 4,1 сек	$23^\circ 27'$
Марс	3400	0,0052	0,150	0,107	3,95	376	—1,71	5,09	24 ч 37 мин 22,6 сек	$25^\circ 12'$
Юпитер	71 400	0,062	1317	318,0	1,33	2600	—225	60,2	9 ч 50 мин 30 сек	$3^\circ 07'$
Сатурн	60 400	0,096	762	95,22	0,687	1120	—176	36,2	10 ч 14 мин	$26^\circ 45'$
Уран	23 800	0,06	50	14,55	1,56	940	—62	21,4	0,89 дня* [28]	$97^\circ 59'$
Нептун	22 300	0,02	42	17,23	2,27	1500	—28	23,4	0,53 дня [28]	29°
Плутон	3 000 [28]	—	1,3	0,9	4	800	—	10	6,39 дня [28]	$> 50^\circ$ [28]

* Вращение обратное.

Фотометрические характеристики планет

Видимые визуальные звездные величины $m_{\text{виз}}$ для Меркурия и Венеры даны для положения наибольшей элонгации ($\alpha = 90^\circ$). Для остальных планет, кроме Земли, — для положения средней оппозиции ($\alpha = 0^\circ$). α — угол фазы, или угловое расстояние Земли до Солнца, видимое с планеты. Значение $m_{\text{виз}}$ для Земли соответствует величине, видимой с Солнца [2, 28].

Планета	$m_{\text{виз}}$	Аль-бедо	Планета	$m_{\text{виз}}$	Аль-бедо
Меркурий	—0,2	0,09	Сатурн	+0,7	0,57
Венера	—4,22	0,77	Уран	+5,51	0,80
Земля	—3,80	0,30	Нептун	+7,85	0,71
Марс	—1,98	0,2	Плутон	+14,87	0,15
Юпитер	—2,50	0,58			

Таблица 46.6

Температурные условия на поверхности планет [3]

Равиовесная температура рассчитана из $\sigma T_{\text{ph}}^4 = Q/R^2$, где Q — солнечная постоянная; R — расстояние до планеты; σ — постоянная Стефана — Больцмана.

Планета	Облучение Солнцем при среднем расстоянии до Солнца		Отношение облучений в перигелии и афелии	Температура дневной полусферы		$T_{\text{ph}}, ^\circ\text{K}$
	тепловое, $\frac{\text{кал}}{\text{см}^2 \times \text{мин}}$	световое, 10^4 лк		из инфракрасных измерений [2], $^\circ\text{K}$	из радионаблюдений [8], $^\circ\text{K}$	
Меркурий	12,7	901	2,31	611	—	631
Венера	3,61	258	1,03	$743 \pm 8^*$	560—580	464
Земля	1,99[2]	135	1,07	295	—	394
Марс	0,81	58	1,45	270	218 ± 76	316
Юпитер	0,070	5,0	1,21	135	145 ± 16	173
Сатурн	0,0208	1,48	1,25	125	110	128
Уран	0,0052	0,366	1,21	103	—	89
Нептун	0,0021	0,149	1,04	108	—	72
Плутон	0,0012	0,087	2,77	—	—	63

* Измерено в месте посадки станции Венера-8 [15].

Атмосферы планет

Количество газа и химический состав определены по наиболее внешним (видимым) слоям планетных атмосфер. Количество газа выражено либо в процентах, либо в значениях высоты приведенной атмосферы из этого газа, взятого при стандартных условиях ($1 \text{ атмо-см} = 2,69 \cdot 10^{19} \text{ молекула/см}^3$).

Меркурий	2000 атмо-см
Венера [15]	$P = (90 \pm 1,5) \text{ атм}$; CO_2 —97%; $\text{N}_2 < 2\%$; $\text{H}_2\text{O} \sim 1\%$; $\text{O}_2 < 0,1\%$; $\text{NH}_3 \approx 0,1 \div 0,01\%$
Земля [2]	$P = 1 \text{ атм}$. N_2 — 78%; O_2 — 21%; $\text{H}_2\text{O} = 0,1 \div 2,7\%$; $\text{Ar} = 0,93\%$; $\text{CO}_2 \approx 0,033\%$; $\text{CH}_4 = 1,5 \cdot 10^{-4}\%$; $\text{H}_2 = 0,5 \times 10^{-4}\%$
Марс [2]	$P = 0,086 \text{ атм}$. N_2 — 99%; $\text{Ar} = 1,1\%$; $\text{CO}_2 = 0,23\%$; $\text{O}_2 < 0,1\%$; $\text{H}_2\text{O} = 0,005\%$; $\text{CH}_4 < 0,005\%$; $\text{NH}_3 < 0,001\%$; $\text{N}_2\text{O}_5 < 0,0005\%$
Юпитер [28]	CH_4 —45 000 атмо-см; NH_3 —970 атмо-см; H_2 — $6,7 \cdot 10^6$ атмо-см; He — $3,4 \cdot 10^6$ атмо-см
Сатурн [28]	CH_4 — $3,5 \cdot 10^4$ атмо-см; NH_3 —250 атмо-см; H_2 — $1,4 \cdot 10^7$ атмо-см
Уран [28]	H_2 — $4,8 \cdot 10^7$ атмо-см; CH_4 — $3,5 \cdot 10^6$ атмо-см
Нептун [28]	CH_4 — $6 \cdot 10^5$ атмо-см

Спутники планет

Приведенные значения наклонений орбит приближительны; R означает обратное движение по отношению к экваторальной плоскости планеты; спутники Урана имеют обратное движение по отношению к плоскости эклиптики; E — наклонение к эклиптике; P — наклонение к плоскости экватора планеты; B — наклонение к плоскости орбиты планеты [1, 10].

Спутники	Расстояние от планеты, 10^3 км	Синодический период, дни ч мин сек	Наклонение орбиты, град	Эксцентриситет орбиты	Радиус, км	Масса, 10^{24} г	$m_{\text{виз}}$ в средней оппозиции
Земли:							
Луна	384,4	29 12 44 3	5,1 E	0,0549	1738	73,4	—12,7
Марса:							
1. Фобос	9,4	7 39 27	1,8 P	0,019	8	—	+11,5
2. Деймос	23,5	1 6 21 16	1,4 P	0,003	4	—	12,5
Юпитера:							
1. Ио	421,8	1 18 28 36	0 P	Малый и переменный	1660	79	+5,5
2. Европа	671,4	3 13 17 54	0 P		1440	47,8	5,7
3. Ганимед	1071	7 3 59 36	0 P		2470	153	5,1
4. Каллисто	1884	16 18 5 7	0 P		2340	90	6,3
5. Амальтея	181	11 57 28	0 P		80	—	13,0
6.	11 500	260 0	28,5 B	0,155	60	—	13,7
7.	11 750	276 10	28,0 B	0,207	20	—	16,2
8.	23 500	631 5	$R33B$	0,38	20	—	16,2
9.	23 700	626	$R 24$	0,25	11	—	17,7
10.	11 750	276	28,3 B	0,140	10	—	17,9
11.	22 500	599	$R16,6 B$	0,207	12	—	17,5
12.	21 000	546	R	0,13	10	—	18,1
Сатурна:							
1. Мимас	185,7	0 22 37 12	1,5 P	0,0196	260	0,038	+12,1
2. Энцелад	238,2	1 8 53 22	0 P	0,0045	300	0,07	11,7
3. Тефия	294,8	1 21 18 55	1,1 P	0,0000	600	0,65	10,6
4. Диона	377,7	2 17 42 10	0 P	0,0021	650	1,03	10,7
5. Рея	527,5	4 12 27 56	0,3 P	0,0009	900	2,3	10,0
6. Титан	1223	15 23 15 25	0,3 P	0,0289	2500	137	8,3
7. Гиперион	1484	21 7 39 6	0,6 P	0,110	200	0,11	14
8. Япет	3563	79 22 4 56	14,7 P	0,029	600	5	11
9. Феба	12950	536 16	$R 30 P$	0,166	150	—	14,5
Урана:							
1. Арнэль	191,8	2 12 29 40	0 P	0,007	300	—	+15,5
2. Умбриэль	267,3	4 3 28 25	0 P	0,008	200	—	16
3. Титания	438,7	8 17 0 0	0 P	0,023	500	—	14,0
4. Оберон	586,6	13 11 15 36	0 P	0,010	400	—	14,2
5. Миранда	130,1						17
Нептуна:							
1. Тритон	353,6	5 21 3 27	$R 20 P$	0,000	2000	150	+13,6
2. Нереида	6000	—	—	0,7	150	0,05	19,5

Система колец Сатурна [2]

Масса колец $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ масс Сатурна
Толщина колец ≤ 10 км
Радиус колец, км:
внешнее кольцо (умеренная яркость) 137 000—120 000
щель Кассини (темная) 120 000—116 000
кольцо B (очень яркое) 116 000—90 000
щель между кольцами B и C (темная) 90 000—89 000
кольцо C (слабое) 89 000—72 000
Экваториальный радиус планеты 60 400

Луна [2]

Расстояние от Земли
среднее (384 404 $\pm$ 2) км
при наибольшем удалении 406 700 км
при наибольшей близости 356 400 км
Радиус 1737,9 км
Масса (7,349 $\pm$ 0,007) $\times 10^{25}$ г =
= $M_{\oplus}/81,33$
Средняя плотность 3,34 г/см³
Ускорение силы тяжести на поверхности Луны 162,0 см/сек²

Синодический период (период полной смены фаз) 29,53029 суток
 Скорость освобождения 2,36 км/сек [14]
 Эксцентриситет лунной орбиты 0,5449
 Наклонение орбиты к эклиптике 5°8'43"
 Период осцилляции наклона орбиты к эклиптике 173 дня
 Величина осцилляции наклона орбиты к эклиптике ±9'
 Видимый угловой радиус на среднем расстоянии от Земли 15'32,6''

Площадь видимой с Земли поверхности 59%
 Средняя орбитальная скорость 1,02 км/сек
 Давление лунной «атмосферы» [1] . . . <0,1 дин/см²
 Температура поверхности
 полная луна, центр диска из инфра-красных измерений 380 °K
 по данным радионаблюдений 230 °K
 новая Луна, центр диска 120 °K
 равновесная, расчетное значение . . 394 °K
 Освещенность от полной Луны над границей земной атмосферы [1] (0,322±0,014) лк

Таблица 46.9

Малые планеты [2]

Номер	Название	Радиус, км	Масса, 10 ²¹ г	Видимая звездная величина <i>m_{pg}</i>	Период обращения вокруг осн		Характеристики орбиты			
					г	мин	Сидерический период, сутки	Большая полуось орбиты, а.е.	Эксцентриситет	Наклонение к эклиптике, град
1	Церера	350	600	4,0	9	05	1681	2,767	0,079	10,6
2	Паллада	230	180	5,1	—	—	1684	2,767	0,235	34,8
3	Юнона	110	20	6,3	7	13	1594	2,670	0,256	13,0
4	Веста	190	100	4,2	5	20	1325	2,361	0,088	7,1
6	Геба	110	20	6,6	7	17	1380	2,426	0,203	14,8
15	Эвномия	140	40	6,2	6	05	1569	2,645	0,185	11,8
511	Давида	130	30	7,0	—	—	2072	3,182	0,177	15,7

Таблица 46.10

Кометы [1]

В таблице дан список периодических комет, которые наблюдались больше одного раза и возвращение которых ожидается: *e* — эксцентриситет; *q* — расстояние в перигелии; *a* — большая полуось орбиты

Комета	Последнее возвращение. Дата прохождения через перигелий (до 1952 г.)	Число наблюдений появлений (до 1952 г.)	Период, годы	<i>e</i>	<i>q</i> , а. е.	<i>a</i> , а. е.
Энке	16/III 1951 г.	43	3,3	0,848	0,34	2,21
Григга—Скьеллерупа	18/IV 1947 г.	7	4,9	0,70	0,88	2,90
Темпеля II	2/VII 1946 г.	10	5,2	0,55	1,3	3,0
Понса—Виннеке	10/VII 1945 г.	14	6,1	0,66	1,14	3,35
Форбса	16/IX 1948 г.	3	6,4	0,55	1,5	3,5
Копфа	11/VIII 1945 г.	6	6,5	0,54	1,5	3,4
Швассмана—Вахмана II	23/VIII 1948 г.	4	6,5	0,39	2,1	3,5
Джакобини—Циннера	18/IX 1946 г.	6	6,6	0,72	1,0	3,55
Дарре	6/VI 1950 г.	10	6,7	0,61	1,37	3,54
Даниэля	24/VIII 1950 г.	4	6,8	0,58	1,5	3,58
Брукса II	25/VIII 1946 г.	8	6,95	0,485	1,87	3,65
Рейнмута I	23/VII 1950 г.	3	7,4	0,49	1,9	3,8
Уинпла	25/VI 1948 г.	3	7,41	0,36	2,45	3,80
Фая	28/IX 1947 г.	13	7,4	0,57	1,66	3,8
Отерма	15/VII 1950 г.	Ежегодно	7,88	0,144	3,39	3,96
Шомасск	25/XI 1943 г.	4	8,1	0,70	1,19	4,0
Вольфа I	23/X 1950 г.	9	8,3	0,40	2,4	4,1
Комас—Сола	11/IV 1944 г.	3	8,52	0,58	1,77	4,17
Вейсала I	10/XI 1949 г.	2	10,55	0,64	1,75	4,8
Неуймина III	27/V 1951 г.	2	10,9	0,59	2,05	4,93
Туттля I	10/XI 1939 г.	8	13,6	0,82	1,02	5,7
Швассмана—Вахмана I	9/VI 1941 г.	Ежегодно	16,2	0,14	5,51	6,4
Неуймина I	15/XII 1948 г.	3	17,8	0,77	1,54	6,8
Кроммелина	4/XI 1928 г.	4	27,9	0,92	0,75	9,2
Понса—Брукса	26/I 1884 г.	2	71,6	0,96	0,78	17,2
Ольберса	8/X 1887 г.	2	72,5	0,93	1,20	17,4
Галлея	19/IV 1910 г.	30	76,0	0,967	0,59	17,9

Физические характеристики комет [1]

Диаметр головы или комы кометы зависит от расстояния до Солнца e :

$r, a. e.$	0,3	0,5	1,0	2,0	3,0
Диаметр, 10^3 км	20	100	200	100	30

Диаметр центральной конденсации ≈ 2000 км

Диаметр ядра ≈ 10 км

Протяженность хвоста, наблюдаемого невооруженным глазом $(10-150) \cdot 10^6$ км

Расстояние от Солнца, начиная с которого появляется хвост $\approx 1,7 a. e.$

Масса M кометы (граммы), имеющей абсолютную звездную величину m :

$$\lg M = 19 - 0,4 m$$

В кометах обнаружены: Na, CH, CN, NH, OH, CH₂, NH₂, CO⁺, N₂⁺, OH⁺, CH⁺.

Метеоры [1]

Средняя масса M , г, и радиус a , см, метеоров, как функции звездной величины $m_{\text{виз}}$:

$$\lg M = -0,1 - 0,4 m_{\text{виз}}, \lg a = -0,7 - 0,133 m_{\text{виз}}.$$

Таблица 46.11

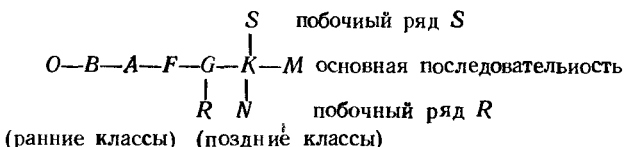
Масса метеоритного вещества, выпадающего на Землю за сутки

Звездная величина	Масса одного метеорита, г	Суммарная масса, 10^6 г
$m_{\text{виз}} < -10$ Видимые	> 8000	~ 1
$-10 < m_{\text{виз}} < +6$ »	$0,003-8000$	~ 5
$6 < m_{\text{виз}} < 30$ Невидимые	$< 0,003$	~ 20

46.4. ЗВЕЗДЫ

Спектральная классификация звезд

Спектры звезд согласно исторически сложившейся классификации делятся на 10 классов, обозначаемых латинскими буквами в следующем порядке:



Принадлежность звезды к данному спектральному классу определяется видом линейчатого спектра звезды. Температура убывает от класса O к классу M . Каждый спектральный класс делится на 10 подклассов, обозначаемых арабскими цифрами от 0 до 9, которые ставятся после буквы, например, F_0 , M_5 . Иногда дают еще более дробную классификацию: ($G 7,3$ или $K 0,2$).

Спектральный класс связан с цветом звезды:

O — голубой цвет	G — желтый
B — голубовато-белый	K — оранжевый
A — белый	M — красный
F — желто-белый	

После обозначения спектрального класса римской цифрой указывается класс светимости звезды:

- I — сверхгиганты (Ia — яркие, Ib — слабые)
- II — яркие гиганты
- III — гиганты

- IV — субгиганты
- V — главная последовательность
- VI — субкарлики
- VII — белые карлики

Кроме перечисленных десяти спектральных классов существуют еще три:

- Q — новые звезды
- P — планетарные туманности
- W — звезды типа Вольфа — Райе

Звезды типа Вольфа — Райе делятся на углеродную последовательность ($WC5$ — $WC8$) и азотную последовательность ($WN5$ — $WN8$).

Для указания класса светимости кроме приведенных обозначений применяются еще и следующие:

- c — сверхгиганты, например $c M 1$
- g — гиганты, » $g G 2$
- d — карлики, » $d G 0$
- sd — субкарлики, » $sd M 2$
- w — белые карлики, » $w A 1$

Для обозначения различных характеристик спектров применяются дополнительные буквы — суффиксы [3]:

- n — необычайно широкие и размытые линии
- s — резкие линии
- k — присутствуют межзвездные линии
- e — присутствуют эмиссионные линии (в тех спектрах, где они не являются постоянной характеристикой)
- er — явно обращенные эмиссионные линии
- eq — эмиссионные линии с прилегающим с фиолетовой стороны поглощением
- ep — присутствуют эмиссионные линии, по своему характеру отличные от нормально соответствующих классу
- ew — эмиссии, типичные для звезд класса W
- em — присутствуют эмиссионные линии металлов в добавление к эмиссионным линиям водорода
- v — переменность спектра (не обусловлена орбитальным движением и пульсацией)
- ev — переменность относится только к эмиссионным линиям
- p — особенный, необычный спектр. Иногда дают расшифровку особенности: α Andromedae AOp ($Mn II$, Un) — присутствует линия ионизованного марганца, происхождение которой неизвестно (Un)
- pq — особенности, напоминающие спектр юной звезды
- con — отсутствуют видимые линии поглощения
- $!$ — чрезвычайно ярко выраженная особенность

Характеристики спектральных классов [1]:

- P — планетарные туманности
- Q — новые
- W — звезды Вольфа — Райе. Горячие звезды с широкими эмиссионными линиями или полосами
- O — горячие звезды с линиями ионизованного гелия в поглощении
- B — линии гелия в поглощении; линии водорода усиливаются к классу A
- A — линии водорода достигают наибольшей интенсивности, а затем ослабевают; линии $Ca II$ усиливаются
- F — линии $Ca II$ усиливаются; линии металлов развиваются; линии H слабеют
- G — линии $Ca II$ железа и других металлов интенсивны; линии водорода слабеют
- K — линии металлов очень интенсивны; развиваются молекулярные полосы
- M — очень красные звезды; сильные полосы поглощения окиси титана
- R, N — полосы поглощения молекулярных соединений углерода, окиси углерода и циана
- S — полосы поглощения окиси циркония

Эффективные температуры звезды [5]

Спектральный класс	$T_{\text{эф}} \cdot ^\circ\text{K}$	Спектральный класс	$T_{\text{эф}} \cdot ^\circ\text{K}$				Сверхгиганты I b
			Главная последовательность V	Субгиганты IV	Гиганты		
					III	II	
B0	25 000	F5	6600	6540	6470	6340	6200
B1	22 500	F6	6390	6210	6020	5910	5800
B2	20 300	F8	6150	5890	5620	5460	5300
B3	18 000	G0	6000	5750	5300	5150	5000
B5	15 600	G2	5730	5350	4990	4770	4600
B6,5	14 000	G5	5520	5080	4650	4470	4290
B8	12 800	G8	5320	4870	4440	4220	4000
B9	11 800	K0	5120	4650	4200	4010	3820
A0	11 000	K1	4920	4450	4000	3850	3700
A1	10 300	K2	4760	4280	3810	3700	3590
A2	9 700	K3	4610	—	3660	3540	3430
A3	9 100	K5	4410	—	3550	3430	3320
A5	8 700	K6	4000	—	—	—	—
A7	8 100	M0	3600	—	3340	3270	3210
F0	7 600	M1	3400	—	3200	3150	3100
F2	7 000	M2	3200	—	3090	3070	3050
		M3	—	—	2980	—	—
		M4	—	—	2850	—	—
		M5	—	—	2710	—	—
		M6	—	—	2600	—	—

Температура центра планетарных туманностей оценивается в $90\,000^\circ\text{K}$, а звезд Вольфа—Райе — $80\,000^\circ\text{K}$.

Звездные величины [1, 5]

Яркость (или блеск) звезд выражается в логарифмической шкале звездных величин (зв. вел.), основанием которой является $10^{0.4} \approx 2,512$. Отношение блеска двух звезд I_1 и I_2 связано с их звездными величинами m_1 и m_2 :

$$m_2 - m_1 = -2,512 \lg(I_2/I_1).$$

Чем ярче звезда, тем меньше ее звездная величина.

Видимые звездные величины обозначаются m .

Абсолютной звездной величиной называется звездная величина, отнесенная к расстоянию 10 пс:

$$M = m + 5 - 5 \lg r - A,$$

где r — расстояние, пс; A — поправка на поглощение света в межзвездном пространстве.

В зависимости от спектральной чувствительности метода измерения различают звездные величины: визуальные $m_{\text{виз}}$, $M_{\text{виз}}$ и фотовизуальные, или желтые $m_{\text{ж}}$, $M_{\text{ж}}$ (определяются фотометрированием изображения, полученного на ортохроматической пластинке с желтым светофильтром. Этот метод по спектральной чувствительности близок к визуальному,

поэтому часто как для фотовизуальных, так и для визуальных звездных величин применяют одно и то же обозначение: v ; виз.)

Фотографические $m_{\text{pg}} = P$; M_{pg} , либо m_{ph} и M_{ph} . При применении синего светофильтра получают фотографические синие звездные величины B , M_B ; ультрафиолетовые U , M_U ; болометрические $m_{\text{бол}}$, $M_{\text{бол}}$.

Разность между фотографической и визуальной величинами называется показателем цвета C , а разность болометрической и визуальной величин — болометрической поправкой Δm . Показатель цвета тем более, чем краснее звезда.

Звезда $M_{\text{бол}} = 0$ излучает $3,03 \cdot 10^{28} \text{ вт}$ [1]. Звезда $m_{\text{бол}} = 0$ дает на границе земной атмосферы поток энергии $= 2,54 \cdot 10^{-6} \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{сек})$ [1]. Звезда $M_{\text{виз}} = 0$ обладает силой света $2,47 \cdot 10^{29} \text{ св}$ [1]. Звезда $m_{\text{виз}} = 0$ создает на границе земной атмосферы освещенность $2,58 \cdot 10^{-6} \text{ лк}$ [1].

Диаграмма Рессела — Герцшпрунга

Три важнейшие характеристики звезды: масса, светимость и радиус могут быть связаны двумя независимыми соотношениями, которые обычно представляют графически. Диаграмма спектр — светимость носит название диаграммы Рессела — Герцшпрунга (рис. 46.2).

Самые яркие звезды [13]

В случае кратных звезд данные относятся ко всей системе в целом. Обозначения следующие: Виз. дв. — визуально-двойная; Сп. дв. — спектрально-двойная; Чет. — четырехкомпонентная система; Перем. — переменная; Виз. тр. — визуально-тройная.

Название звезды	Звездная величина		Расстояние [4], пс	Спектр [1]	Примечание [1]
	видимая m	абсолютная M			
Сириус	-1,5	1,4	2,66	A1	Виз. дв.
Канопус	-0,9	-4,6	55	cF0	—
α Центавра	0,1	+4,7	1,32	G2, K3	Виз. тр.
Вега	0,1	+0,6	8,1	A0	—
Капелла	0,2	-0,5	13,7	gG1	Сп. дв.
Арктур	0,2	0,0	11	gK0	—
Ригель	0,3	-6,2	200	cB8	Чет.
Процион	0,5	+2,8	3,37	F5	Виз. дв.
Ахернар	0,6	-1,7	42,8	B5	—
Агея	0,9	-3,1	61	gB1	Виз. дв.
Альтаир	0,9	+2,4	5,0	A7	—
Бетельгейзе	0,9	-5,6	200	c M2	Перем.
α Южного Креста	1,1	-2,8	67	B1	Виз. дв.
Альдебаран	1,1	-0,5	21	gK5	Виз. дв.
Поллукс	1,2	+1,0	10,7	gG3	—
Спика	1,2	-2,2	49	B1	Сп. дв.
Антарес	1,2	-2,4	52	cM1	Виз. дв.
Фомальгаут	1,3	+2,1	70	A3	—
Денеб	1,3	-5,2	165	cA2	—
Регул	1,3	-0,7	25,7	B8	Виз. тр.

Таблица 46.13

Ближайшие звезды [13]

Звезда	Расстояние, пс	Звездная величина		Спектр
		видимая m	абсолютная M	
Солнце	$4,85 \cdot 10^{-6}$	-26,7	+4,9	G4
Проксима Центавра	1,31	+11,3	15,7	M
α Центавра A	1,32	0,3	4,7	G4
α Центавра B	1,32	1,7	6,1	K1
Звезда Барнарда	1,84	9,5	13,1	M5
Лаланд 21185	2,46	10,7	13,7	M2
Вольф 359	2,48	13,5	16,5	M8
+36° 2147	2,58	7,5	10,4	M2
Сириус	2,66	-1,5	1,4	A1
Спутник Сириуса	2,66	+8,5	11,4	A5
Росс 154	2,86	10,5	13,2	M5
Росс 248	2,99	12,2	14,7	M6
Лейтен 7896	3,05	12,3	14,9	M6
ϵ Эрида	3,30	3,8	6,2	K2
Процион	3,37	0,5	2,8	G4
Спутник Проциона	3,37	10,8	13,1	—
61 Лебедя	3,38	5,4	7,7	K3
Спутник 61 Лебедя	3,38	6,1	8,4	K5
τ Кита	3,40	3,7	6,0	G5
ϵ Индейца	3,47	4,7	7,0	K5

Переменные звезды [18]

Переменные звезды делятся на три основных класса: пульсирующие, эруптивные и затменно-двойные.

Пульсирующие переменные звезды. Ниже приведены характерные особенности пульсирующих переменных звезд. Перед названием класса стоит его условное обозначение, после названия — число объектов, зарегистрированных на 1958 г.

С. Долгопериодические (классические) цефеиды. 610. Период и форма кривой блеска постоянны. Периоды лежат в диапазоне от 1 до 70 дней. Амплитуда пульсаций $0,1-2^m$. Спектральный класс в минимуме блеска G—K, в максимуме блеска — F. Скорость увеличения радиуса до 20 км/сек.

I. Неправильные переменные. 1370. Признаки периодичности выражены очень слабо или совсем отсутствуют.

M. Звезды типа Миры Кита. 3657. Долгопериодические гиганты с периодами от 80 до 1000 дней. Амплитуды изменения блеска $2,5-5^m$. Спектры: эмиссионные поздних спектральных классов (Me, Se).

SR. Полуправильные переменные. 1675. Гиганты или сверхгиганты, обладающие заметной периодичностью, периоды — от 30 до 1000 дней. Амплитуда изменения блеска $1-2^m$.

RR. Переменные типа RR Лиры. 2426. Короткопериодические гиганты с периодами от 1 ч до 1 дня. Амплитуда изменения блеска $1-2^m$. Спектральный класс,

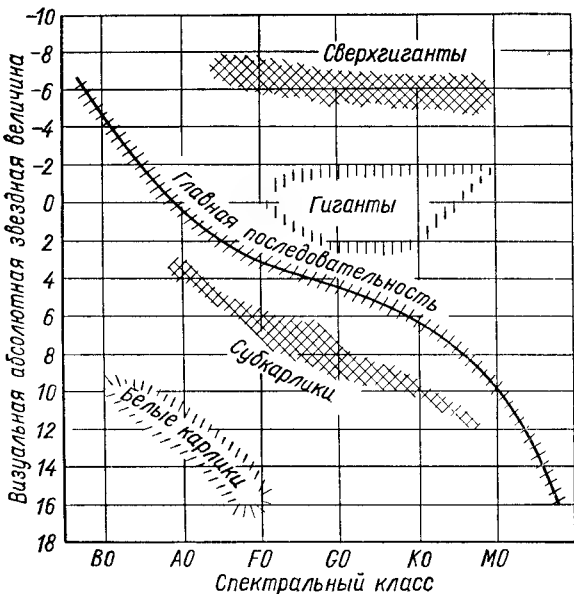


Рис. 46.2. Диаграмма Ресселя — Герцшпрунга [4, 13] спектр — светимость с основными разновидностями звезд населения I.

как правило, А. Период и форма кривой блеска постоянные. Скорость увеличения радиуса до 100 км/сек.

RV. Звезды типа RV Тельца. 92. Сверхгиганты. Периоды от 30 до 150 дней, амплитуда до 3^m. Спектральные классы G, K, M.

β C. Звезды типа β Цефея. 11. Пульсирующие гиганты, амплитуда изменения блеска ~0,1^m. Периоды от 2,5 до 7 ч. Спектр В1—В3.

δ Sc. Звезды типа δ Щита. 5. Переменные класса F с амплитудами 0,25^m и периодами до 1 дня.

α CV. Звезды типа α Гончих Псов. 9. Амплитуда изменения блеска ~0,1^m. Периоды от 1 до 25 дней. Спектр: Ar, сильные линии кремния, стронция, хрома и редкоземельных элементов. Обладают мощными магнитными полями, изменяющимися вместе с изменением блеска и спектра.

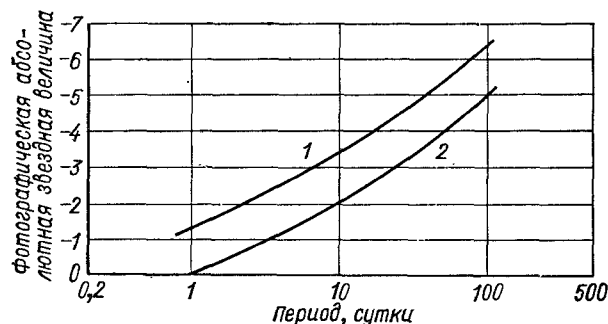


Рис. 46.3. Зависимость период — светимость для цефеид [4]:

1 — классические цефеиды (δ-Цефея); 2 — цефеиды населения II (RR-Лиры).

Средняя абсолютная звездная величина связана у цефеид с периодом изменения блеска. Зависимость период — светимость несколько различна для звезд, концентрирующихся к галактической плоскости (классические цефеиды), и звезд, встречающихся в шаровых скоплениях (звезды населения II).

Эруптивные переменные. Ниже приведены характерные особенности эруптивных переменных звезд. Перед названием класса стоит его условное обозначение, после названия — число объектов, зарегистрированных на 1958 г.

N. Новые звезды. 146. Карликовые горячие звезды, внезапно, за время от одного до нескольких десятков дней, увеличивающие блеск на 7—16^m и затем в течение нескольких лет остывающие до первоначального состояния. Вблизи максимума блеска спектр класса A или F с линиями поглощения. После достижения максимума блеска появляются широкие эмиссионные линии водорода, гелия и других элементов [3]. Скорость выбрасывания вещества от 300 до 1600 км/сек. Полная энергия, выделяемая за вспышку, до 10⁴⁵ эрг. Частота вспышек в Галактике ~2 в год [1].

Ne. Новоподобные переменные. 35. Напоминают новые характером изменения блеска или спектральными особенностями.

SN. Сверхновые звезды. 7. Внезапно увеличивающие блеск на 20 и более звездных величин и затем медленно ослабевающие. Спектр характеризуется очень широкими эмиссионными полосами. После вспышки спектр O, WC или WN. Скорости сбрасывания оболочки достигают 8000 км/сек. Полная энергия вспышки до 10⁴⁹ эрг. Частота появлений в Галактике ~1 вспышка за 250 лет [1].

RCV. Звезды типа R Северной Короны. 39. Звезды высокой светимости классов F — K и R, характеризующиеся медленными непериодическими ослаблениями блеска на 1—9^m. В минимуме блеска появляются эмиссионные линии металлов.

RW. Звезды типа RW Возничего. 590. Характеризуются быстрыми и неправильными изменениями блеска. Амплитуды достигают нескольких звездных величин. Большинство звезд связано с диффузными туманностями.

UG. Звезды типа U Близнецов. 112. Карликовые звезды, за 1—2 дня увеличивающие свой блеск на 2—6^m, затем ослабевающие в течение нескольких десятков дней. Средняя частота вспышек от 20 до 600 дней. Строгой периодичности нет. Спектр с эмиссионными линиями H I, He I и He II, Ca II. В максимуме блеска линии исчезают.

Список галактических новых [2]

Таблица 46.15

Новая	Год вспышки	Видимая звездная величина			Спектр после вспыш- ки	Время уменьшения блеска на 3 ^m , дни	Тип
		начальная стадия	максимум	конечная стадия			
Тельца (Краб)	1054	—	—6	—	Э. т.*	—	SN I
Кассиопей (Тихо)	1572	—	—4,1	—	Э. т.	—	SN I
Змееносца (Кеплера)	1604	—	—2,2	—	—	—	SN I
T Возничего	1891	13	4,0	14,8	Oe	120	N
Персея-2	1901	13,5	0,2	13,3	Oe	12	N
Ящерицы	1910	13,7	4,6	14,3	Ocon	37	N
Близнецов-2	1912	15	3,5	14,6	Oe	34	N
Орла-3	1918	10,6	—1,1	10,6	Oe	7	N
Лиры	1919	16,0	6,5	15,0	Ocon	70	N
Лебедя-3	1920	15	2,0	16,1	Oe	14	N
RR Скульптора	1925	12,7	1,2	9	—	150	N
DQ Геркулеса	1934	14,3	1,4	13,8	—	105	N
CP Ящерицы	1936	15,3	2,1	14,9	—	9	N
Кормы	1942	17	0,2	—	Oe	8	SN?

* Э. т. — Эмиссионная туманность.

UV. Звезды типа UV. Кима. 15. Карликовые звезды спектральных классов $dM3e - dM6e$. В течение нескольких десятков секунд увеличивают блеск 1—6^m. Полная продолжительность вспышки несколько десятков минут.

Звезды типа Z Жирафа. 15. Схожи с UG, но имеют периоды постоянства блеска. Амплитуды изменения блеска: от 2 до 5^m. Длительности циклов колеблются от 10 до 40 дней.

Затменно-двойные звезды [18]. Обозначение E. На 1958 г. зарегистрировано 2763 объекта. Двойные системы с плоскостью орбиты, близкой к лучу зрения наблюдателя. При вращении вокруг общего центра тяжести один компонент затмевает другой. Периоды изменения блеска совпадают с периодами обращения по орбите (от нескольких часов до десятков лет). Амплитуда изменения блеска может достигать нескольких звездных величин.

Пульсары

Предположительно пульсары — это карликовые или нейтронные звезды, заметно меняющие свой блеск в радиодиапазоне (наиболее изучены дециметровый и метровый диапазоны). Для некоторых пульсаров обнаружены пульсации в видимом свете и рентгеновском излучении. Периодичность пульсаций весьма велика (с погрешностью до 10—6%). Замечено, что периоды мерцания пульсаров могут плавно увеличиваться на величину от 10⁻⁶ сек/год до 10⁻⁷ сек/год.

Таблица 46.16

Характеристики пульсаров, обнаруженных до 9 февраля 1970 г. [16]

Обозначения: AP 1541+09; P — пульсар; прямое восхождение $\alpha=15$ ч 41 мин; склонение 9°.

Название пульсара	Галактическая широта, град	Период, сек	Расстояние, пс	Длительность импульса, мсек
MP 0031	-07	0,940	300	25
MP 0254	-54	0,448	250	10
CP 0329	+54	0,714	670	7
MP 0450	-18	0,554	625	20
NP 0527	+21	3,745	1250	148
NP 0531	+21	0,033	1400	9,5
PSR 0628—28	-28	1,244	250	50
MP 0736	-40	0,374	2400	40

Продолжение табл. 46.16

Название пульсара	Галактическая широта, град	Период, сек	Расстояние, пс	Длительность импульса, мсек
CP 0808	+74	1,292	140	90
MP 0818	-15	1,237	—	25
AP 0823+26	+26	0,530	480	13
PSR 0833—45	-45	0,089	500	2
CP 0834	+06	1,273	320	38
MP 0835	-40	0,765	3000	20
PSR 0904+77	+77	1,579	—	<80
MP 0940	-56	0,662	3620	30
PP 0943	+08	1,093	440	24
CP 0950	+08	0,253	70	21
MP 0959	-56	1,438	2250	50
CP 1133	+16	1,188	120	43
MP 1154	-62	0,400	6750	—
AP 1237+25	+25	1,382	210	60
MP 1240	-63	0,388	5500	60
MP 1359	-50	0,690	—	20
MP 1426	-66	0,788	1500	10
MP 1449	-65	0,180	2250	5
PSR 1451—68	-68	0,263	300	25
HP 1508	+55	0,739	490	20
MP 1530	-53	1,372	500	25
AP 1541+09	+09	0,748	870	100
MP 1604	-03	0,421	—	10
PSR 1642—03	-03	0,387	825	20
MP 1706	-15	0,654	250	20
MP 1727	-50	0,835	3500	30
MP 1747	-48	0,742	1000	20
PSR 1749—28	-28	0,562	1270	4,7
MP 1818	-03	0,600	1750	20
MP 1857	-25	0,611	—	35
MP 1911	-05	0,825	1875	20
CP 1919	+21	1,337	310	40
PSR 1929+10	+10	0,227	200	10
JP 1933+16	+16	0,358	3570	—
MP 1944	+17	0,440	—	35
JP 1946	+35	0,717	—	—
AP 2015+28	+28	0,557	360	28
JP 2022	+51	0,529	—	—
PSR 2045—16	-16	1,961	280	100
JP 2113	+46	1,014	—	—
PSR 2218+47	+47	0,538	1100	30
AP 2303+30	+30	1,575	—	30

Таблица 46.17

Белые карлики [2]

Звезда	Спектр	$m_{\text{внз}}$	$M_{\text{внз}}$	$\lg \frac{M}{M_{\odot}}$	$\lg \frac{R}{R_{\odot}}$	$\lg \frac{\rho}{\rho_{\odot}}$
Ван Маанена	wF8	12,35	14,24	+0,1	-1,95	6,0
40 Эридапа В	wA2	9,5	11,0	-0,37	-1,82	5,1
Сириус В [27]	wA5	10,0	11,3	-0,01	-2,11	6,328*
Процион В	wF8	10,8	13,1	-0,29	-1,9	5,4
R 627	wA5	14,24	13,8	-0,2	-2,3	6,7
W 1346	wA2	11,5	10,8	+0,4	-1,81	5,8

* Ускорение силы тяжести 4,5·10⁸ см/сек². Гравитационное красное смещение, расчет 83 км/сек; измерено (81 ± 6) км/сек [27]

Гиганты [10, 17]

Звезда	Спектр	Светимость		Температура поверхности, °К	Радиус (Солнце-1)	Плотность, г/см³
		$m_{\text{виз}}$	$M_{\text{виз}}$			
Канелла	gG1	0,09	—0,06	5500	12	$2,4 \cdot 10^{-3}$
Арктур	gK0	—0,06	—0,0	4100	30	$3 \cdot 10^{-4}$
Альдебаран	gK5	1,1	—0,1	3300	60	$2 \cdot 10^{-5}$
Шеат	gM5	2,6	—1,4	2900	170	$2 \cdot 10^{-6}$
Бетельгейзе	cM2	0,73	—4,1	3100	290	$6 \cdot 10^{-7}$
Антарес	cM1	1,0	—4,6	3100	480	$3 \cdot 10^{-7}$
Мира	cM7e	—	—0,8	—	460	—
Рас-Альгети	cM8	—	—3,4	—	800	—

46.5. ГАЛАКТИКА И ВСЕЛЕННАЯ

Галактика [2]

Диаметр ~ 25 кпс
Толщина ~ 4 кпс
Масса $\sim 1,1 \cdot 10^{11} M_{\odot}$

Общая средняя плотность $\sim 7 \cdot 10^{-24}$ г/см³ = $0,1 M_{\odot}/\text{пс}^3$

Средняя плотность в центре Галактики $4 M_{\odot}/\text{пс}^3$

Абсолютная звездная величина (если смотреть со стороны северного полюса Галактики). $M_{\text{виз}} = -20,5^m$

Скорости освобождения для галактического центра 450 км/сек

для окрестностей Солнца 290 км/сек

для границ Галактики 180 км/сек

Потенциальная энергия Галактики $1,1 \cdot 10^{59}$ эрг

Скорость галактического вращения на разных расстояниях от центра Галактики [4]:

Расстояние, св. лет	Скорость, км/сек
5000	150
10 000	190
15 000	220
20 000	230
25 000	224
30 000	213
35 000	197
40 000	180

Плотность звездной материи в окрестностях Солнца $0,05 M_{\odot} \cdot \text{пс}^{-3} = 3,5 \cdot 10^{-24}$ г/см³ [1].

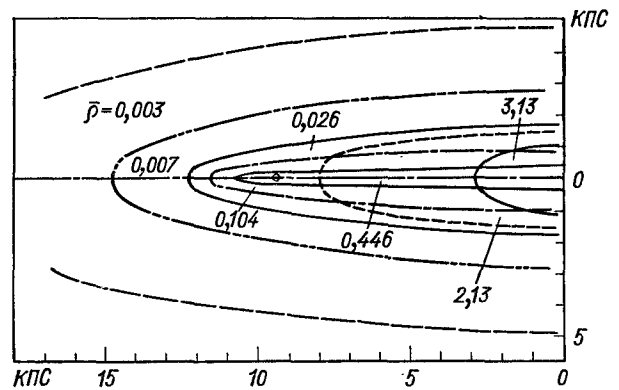


Рис. 46.4. Схематическая модель Галактики [4]. Положение Солнца отмечено кружком. Средние плотности даны в единицах плотности материи вблизи Солнца.

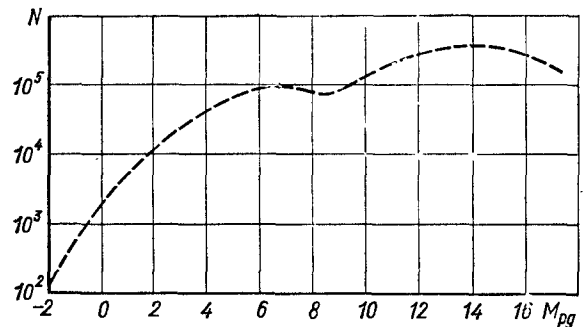


Рис. 46.5. Функция светимости [4]. По вертикальной оси отложено число звезд в кубе с ребром 1000 световых лет в окрестностях Солнца в зависимости от абсолютной звездной величины.

Таблица 46.19

Продолжение табл. 46.19

Характеристики галактических подсистем [3]

Подсистемы	Полутолщина однородного слоя, pc	Число известных объектов	Предполагаемое число объектов
Объекты, концентрирующиеся около галактической плоскости			
Долгопериодические цефеиды	44	500	$3 \cdot 10^4$
Звезды класса B	46	10 000	$1,5 \cdot 10^5$
Рассеянные звездные скопления	53	500	$3,3 \cdot 10^4$
Звезды класса O	58	200	$6,5 \cdot 10^3$
Темные (пылевые) туманности	100	10^4	10^8
Сверхновые звезды	—	7	—
Подсистемы промежуточной составляющей			
Новые звезды	182	100	10^6
Переменные типа RV Тельца	200	92	$10^4 - 10^5$
Звезды классов R, N	100—300	435	$3,35 \cdot 10^4$
Планетарные туманности	217	350	$1,3 \cdot 10^5$
Звезды класса S	360	90	$5 \cdot 10^3$
Белые карлики	400	100	$6 \cdot 10^3$
Долгопериодические переменные звезды	500	3000	$1,3 \cdot 10^6$

Подсистемы	Полутолщина однородного слоя, pc	Число известных объектов	Предполагаемое число объектов
Объекты, составляющие сферическую часть Галактики			
Долгопериодические переменные с периодом $P = 150 - 200$ дн	2000	300	10^5
Короткопериодические цефеиды	2000	3000	$1,7 \cdot 10^4$
Долгопериодические цефеиды типа W Девы	2000	50	$2 \cdot 10^4$
Субкарлики	2600	300	10^{11}
Шаровые звездные скопления	3000	100	250
Все звезды в среднем	380	10^9	$1,2 \cdot 10^{11}$

В звездное население I типа входят: горячие гиганты и сверхгиганты, долгопериодические цефеиды, новые и сверхновые звезды, рассеянные скопления, водородные облака, пылевые туманности.

В звездное население II типа входят: красные карлики, красные гиганты, короткопериодические цефеиды, шаровые скопления. Звездное население II типа образует ядра галактик и преобладает в областях, удаленных от основной плоскости спиральных галактик.

Среднее энерговыделение, отнесенное к единице массы для звездного населения для I и II типа, составляет соответственно 100 и 0,1 $эрг/(г \cdot сек)$ [3].

Межзвездная среда

Таблица 46.20

Яркие диффузные туманности [2]

К ярким туманностям E -типа относятся туманности с эмиссионными линиями в спектре. E -туманности светятся вследствие возбуждения атомов светом близлежащей звезды, обычно принадлежащей к более раннему, чем $B1$ спектральному классу. Яркие туманности C -типа отражают свет близлежащих звезд.

Туманность	Тип	$m_{\text{виз}}$	Расстояние, pc	Угловой диаметр, $сек$	Плотность атом/ $см^3$	Масса, $M_{\odot} = 1$	Возбуждающая звезда	
							Спектр	$M_{\text{виз}}$
Крабовидная NGC 1952	E	8,6	1050	5	1000	—	—	—
Большая туманность в Орионе NGC 1976	E	4	460	30	600	700	Oe	5,4
Розетка NGC 2237	E	—	1400	60	30	9000	$O5e$	7,3
Лагуна NGC 6523	E	5,8	1500	25	30	3000	$O5e$	6,0
Северная Америка NGC 7000	CE	—	800	50	10	3000	$O6$	6,0
Туманность в Плеядах NGC 1432	C	—	126	40	—	—	$B5$	3,0

Таблица 46.21

Параметры различных типов темных туманностей [1]

Параметры	Глобула		«Угольный мешок»	Большое облово
	I	II		
Диаметр, pc	0,06	0,5	8	40
Полное поглощение проходящего света A_{pg} , зв. вел.	5	1,5	1,5	1,4
Плотность вещества, ρ , $г/см^3$	$\geq 10^{-21}$	$5 \cdot 10^{-23}$	$3 \cdot 10^{-24}$	$5 \cdot 10^{-25}$
Масса, $M_{\odot} = 1$	$\geq 0,002$	0,05	13	300

Поглощение света звезд, межзвездная пыль [2]

Поглощение света звезд вблизи галактической плоскости A_{pq}	2,0 зв. вел./кпс
Для звезд, свет которых не задерживается облаками A_{pq}	0,3 зв. вел./кпс
Средняя плотность пылинок в пространстве вблизи галактической плоскости	$1,3 \cdot 10^{-26}$ г/см ³
Масса пылинок	10^{-13} г
Температура пылинок	25° К

Межзвездный газ [1]

Средняя плотность межзвездного газа $1,2 \cdot 10^{-24}$ г/см³ = 0,7 атомов водорода в 1 см³. Химический состав межзвездного газа совпадает с общей космической распространенностью элементов.

В соответствии с состоянием межзвездного газа различают области HI и HII. В областях HI водород в

основном нейтрален, а металлы ионизованы. Кинетическая температура $T \approx 90^\circ$ К. В областях HII водород и металлы ионизованы. Кинетическая температура $T \approx 10\,000^\circ$ К.

Излучение и поля в межзвездном пространстве [2]

Плотности энергии:	эрг/см ³
Реликтовое излучение [22]	$0,6 \cdot 10^{-12}$
Излучение (свет звезд)	$0,7 \cdot 10^{-12}$
Турбулентное движение газа	$0,5 \cdot 10^{-12}$
Общее галактическое вращение	$1300 \cdot 10^{-12}$
Космические лучи	$1 \cdot 10^{-12}$
Магнитные поля	$4 \cdot 10^{-12}$
Эквивалентная температура реликтового излучения T	$2,9 \pm 0,7^\circ$ К
Напряженность межзвездного магнитного поля	$1 \cdot 10^{-5}$ гс

Внегалактические туманности (галактики) [1]

Согласно классификации Хаббла, галактики делятся на правильные и неправильные. Правильные галактики подразделяются [19] на спиральные S и эллиптические E. В соответствии со степенью развития спиральной структуры спиральные галактики имеют подтипы So, Sa, Sb, Sc для галактик с центральным ядром и

Таблица 46.22

Распределение галактик по абсолютным величинам [13]

Абсолютная звездная величина	Количество галактик S и Ir в 1000 Mpc ³	Количество галактик E в 1000 Mpc ³
От -21 до -22	0,025	—
От -20 до -21	0,52	0,091
От -19 до -20	6,9	1,7
От -18 до -19	19	5,5
От -17 до -18	30	6,9
От -16 до -17	55	9,1
От -15 до -16	155	—

Таблица 46.23

Члены местной группы галактик [19] и некоторые ярчайшие галактики [13]

Галактика	Тип	Расстояние Δ, Mpc	Звездная величина		Угловые размеры, мин	Диаметр, кпс	Масса M , $10^9 M_\odot$	Лучевая скорость, км/сек
			видимая	абсолютная				
Галактика	Sbc	—	—	-19	—	30	110 [2]	—
Большое Магелланово Облако	Ir 1	0,048	0,63	-18,1	$10^\circ \times 9,5^\circ$	8,4	6	+280 [1]
Малое Магелланово Облако	Ir 1	0,048	2,8	-16,0	$4^\circ \times 2^\circ$	3,9	13	-167 [2]
Туманность Андромеды, M31, NGC 224	Sb	0,69	4,4	-20,3	197×92	40	340	-35
NGC 205	E5p	0,69	8,9	-15,8	26×16	5,2	1,6 [1]	-8
M32, NGC 221 } Спутники M31	E2	0,69	9,1	-15,6	12×8	2,4	1,8	+17
Система в Скульпторе	dE	0,11	9,2	-11,2	—	—	0,002	—
Система в Печи	dE	0,23	9,1	-12,9	60	4,0	0,02	+40 [2]
M81, NGC 3031 } Группа Большой	Sb	1,54	7,9 [1]	-18,7	16×10	6 [1]	150	+80 [2]
M82, NGC 3034 } Медведицы	Ir 1	3,3	9,3 [1]	-16,8	8 [1]	2,7 [1]	15	+390 [1]
NGC 55	Ir 1	1,9 [2]	7,1 [2]	-19,2 [2]	25 [1]	—	40	+180 [2]
NGC 253	Sb	2,2 [2]	7 [2]	-20 [2]	22 [1]	8 [1]	30	-70 [2]
NGC 5236	Sc	4,0 [2]	7,6 [2]	-19,1	10×8	12 [2]	—	+320 [2]
Сомбреро [2]	Sa	4,4	8,1	-20,4	—	8	130	1020
NGC 4594	Sa	5,0	9,0 [1]	-20,7	$7 \times 1,5$	3,0	50	1130 [1]
NGC 4486 [2]	E0	11	8,9	-21,5	—	13	1000	1220 [2]

SBo, SBa, SBb, SBc для галактик с ядром, находящимся посередине перемычки, соединяющей спиральные ветви. Эллиптические галактики делятся на подтипы от *E0* до *E7* по степени увеличения сплюснутости эллипса. Неправильные галактики обозначаются *Ir*. Индекс I приписывается неправильным галактикам клочковатой формы, не имеющим ядра, индекс II приписывают неправильным галактикам неразрешенной структуры (на звезды, скопления, области HII и т. п.). При наличии некоторых отклонений в структуре галактики от типичных свойств добавляется индекс *p* (например, *ESp*).

Пространственная плотность галактик 3 Mpc^{-3}
Вклад излучения галактик в яркость неба на 1 кв. град $0,5 (m_{pg} = 10)$
Средняя масса галактик $\sim 5 \cdot 10^{10} M_{\odot} = 10^{48} \text{ г}$
Количество звезд в галактиках $10^9 - 10^{11}$
Зависимость масса M_G — светимость M_{pgG} для галактик:
 $\lg M_G \approx \lg M_{\odot} - 0,4 M_{pgG} + 3,16$.

Вселенная

Внегалактические туманности имеют тенденцию удаляться от нашей Галактики. Скорость удаления v , км/сек, связана с расстоянием до галактики: $v = HR$, где H — постоянная Хаббла, R — расстояние, Мпс (выражение справедливо при $v \ll c$)

$$H = 75 (\text{км/сек})/\text{Мпс} = 2,44 \cdot 10^{-18} \text{ сек}^{-1} [19]$$

Возраст Вселенной [25] $1/H = 13 \cdot 10^9 \text{ лет}$

Средняя плотность материи [1] $\rho = 10^{-29} \text{ г/см}^3$

Численность галактик в наблюдаемой части Вселенной [1] $\sim 10^{10}$

Масса наблюдаемой части Вселенной [2] $10^{54} - 3 \cdot 10^{53} \text{ г}$

Плотность излучения [1] $4 \cdot 10^{-13} \text{ эрг/см}^3$

46.6. КОСМИЧЕСКОЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ

Поверхностная интенсивность радиоизлучения неба J связана с эквивалентной температурой T и частотой ν [1]:

$$J_{\nu} = 3,0715 \cdot 10^{-40} T \nu^2 \text{ вт/(м}^2 \cdot \text{стер} \cdot \text{гц)}$$

(T — в градусах Кельвина, ν — в герцах).

Яркость радиосвечения неба имеет хорошо выраженный максимум в направлении на галактический центр. Яркие дискретные радиоисточники, как правило, не совпадают с яркими оптическими звездами.

Излучение межзвездного водорода ($\nu = 1420 \text{ Мгц}$) тоже концентрируется к плоскости Млечного Пути, но резкий максимум в направлении на центр Галактики отсутствует [8].

Средняя эквивалентная температура небесной сферы на частоте 100 Мгц составляет 700° К [1].

Излучение от полной небесной сферы на частоте 100 Мгц

$$W = 2,7 \cdot 10^{-20} \text{ вт/(м}^2 \cdot \text{сек)} [1].$$

Спектры различных источников характеризуются спектральными индексами α или n , причем $\alpha + n = 2$:

$$J_{\nu} \sim \nu^{\alpha} \sim \lambda^{n-2}; \quad T \sim \nu^{\alpha-2} \sim \lambda^n.$$

Значения α и n для $\nu \approx 100 \text{ Мгц}$ [2]:

Источники	α	n
Галактические (в среднем)	-0,71	2,71
Внегалактические	-1,05	3,05
Неидентифицированные	-1,21	3,21
Общее галактическое излучение	-0,45	2,45
Участки холодного неба	-0,60	2,60

Число радиоисточников N в единице телесного угла дающих поток больше F при $\nu = 100 \text{ Мгц}$ [2]:

$F, \text{ вт/(м}^2 \cdot \text{гц)}$	10^{-23}	10^{-24}	10^{-25}
$\lg N$	-1	+0,3	+2,1

Таблица 46.24

Спектральный состав радиоизлучения различных участков неба [26]

T_A — эквивалентная температура участка неба близкого к галактическому центру. T_B — температура участка на экваторе. Участок В расположен в холодной области неба вдали от галактического экватора.

$\nu, \text{ Мгц}$	$T_A, ^\circ \text{К}$	$T_B, ^\circ \text{К}$	$T_V, ^\circ \text{К}$
18,3	$2 \cdot 10^5$	75 000	50 000
40	67 000	900	8500
64	21 000	3100	2200
90	7700	—	—
100	6000	720	490
160	2180	—	—
200	1190	120	70
480	145	16,6	—
1200	17,9	—	—
3000	2,77	—	—

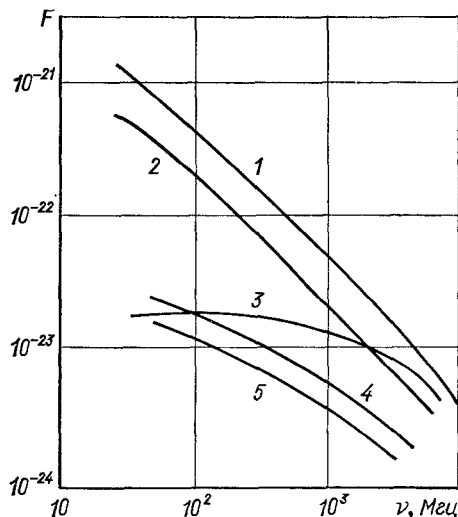


Рис. 46.7. Спектральный состав наиболее мощных дискретных источников радиоизлучения [26]:
1 — Кассиопея А; 2 — Лебедь А; 3 — Телец А; 4 — Центавр А; 5 — Дева А.
 F — поток излучения, $\text{вт/(м}^2 \cdot \text{гц)}$.

Некоторые галактические источники радиоизлучения [8]

Источник	Расстояние Δ , клс	Угловые размеры	α для частоты $\nu = 100 \text{ Мгц}$	Поток F , $10^{-26} \text{ вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$		Описание
				$\nu = 100 \text{ Мгц}$	$\nu = 1000 \text{ Мгц}$	
Лебедь X	$\sim 1,5$	$5^\circ [1]$	$-0,2 [1]$	4900*	—	Тепловой источник, область H II
Туманность Омега (NGC 6618)	1,7	$0, 45^\circ$	—	1300*	—	Тепловой источник, область H II
Туманность Северная Америка	0,9	$2, 5^\circ$	—	550*	—	Тепловой источник, область H II
Туманность Розетка (NGC 2244)	1,4	$1, 33^\circ$	$-0,17$	500	320	Тепловой источник, область H II
Кассиопея А	3,4	$3' \times 4'$	$-0,8$	19 000	3100	Остатки сверхновой II типа 369 г.
Крбовидная туманность (M1)	1,1	$3', 5' \times 5', 5'$	$-0,26$	1700	1100	Остатки сверхновой I типа 1054 г.
Кассиопея Э	0,36	$6'$	$-0,7$	250	56	Остатки сверхновой I типа Тихо Браге 1572 г.
Сверхновая Кеплера	1,0	$2,5'$	—	80	—	Остатки сверхновой I типа 1604 г.

* Приведено для частоты $\nu = 22 \text{ Мгц}$.

Таблица 46.26

Внегалактические источники радиоизлучения [8]

Источник	Рас- стояние Δ , Мпс	$m_{\text{виз}}$	Угловые размеры		α для час- тоты $\nu = 100 \text{ Мгц}$	Поток F , для $\nu = 100 \text{ Мгц}$, $10^{-26} \text{ вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$	η радио [9], эрг/сек	Описание
			оптичес- кие	радио				
Лебедь А	220	17,9	$2''$	$85''$	$-0,68$	11 800	10^{44}	$M = -21,1$. Сталкиваю- щиеся галактики
Дева А (NGC 4486)	11	9,9	$11''$	$11''$	$-0,73$	1780	$8 \cdot 10^{40}$	$M = -20,5$. Сферическая га- лактика с голубым выбросом
Центавр А (NGC 5128)	4	6,5	$20''$	$3^\circ \times 8^\circ$	$-0,66$	1750	10^{40}	$M = -21,3$. Столкновение эллиптической и спираль- ной галактик
Геркулес А	340	17,6	$0,5''$	$2,5''$	$-0,8$	580	$4 \cdot 10^{43}$	Двойная галактика с ли- ниями излучения
Гидра А	210	15,9	$0,5''$	$1''$	—	400	—	То же
Персей А (NGC 1275)	70	13,3	$2,4''$	$2,4''$	$-0,8$	130	$3 \cdot 10^{41}$	Сталкивающиеся галактики

Кварзары

Кварзары — это квазизвездные внегалактические источники, радиоизлучение которых подобно радиоиз-

лучению наиболее мощных радиогалактик. Кварзары ха-
рактерны голубоватым цветом и яркими линиями в
спектре, имеющими большое красное смещение [19].
Обозначение: QSS.

Таблица 46.27

Характеристики некоторых квазаров [13]

При оценке расстояний Δ использовалось значение постоянной Хаббла $H=75 \text{ км/(сек} \cdot \text{Мпс)}$. Расстояние оценивается из скорости разбегания v_r ; $\Delta = v_r/H$, а скорость разбегания оценивается по красному смещению $Z = \Delta\lambda/\lambda$ из графика рис. 46.8.

Квазар	$Z = \Delta\lambda/\lambda$	$v_r \cdot 10^3$ км/сек	Δ , Мпс	Угловые размеры
3C 273	0,16	49 [19]	650	$< 0,2''$ [19]
3C 48	0,37	90	1200	$< 1'$
3C 147	0,55	130	1750	$< 1'$
3C 254	0,734	155	2000	—
3C 245	1,029	180	2400	—
3C 287	1,055	185	2500	—
3C 286	1,86	230	3100	$< 1'$
3C 9	2,012	240	3200	

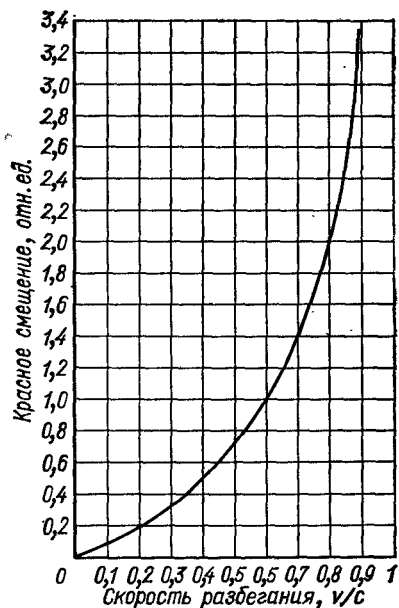


Рис. 46.8. Красное смещение удаленных галактик [21].

46.7. КОСМИЧЕСКИЕ ПОЛЕТЫ И ИСКУССТВЕННЫЕ СПУТНИКИ ЗЕМЛИ

Время существования спутника массой 100 кг и диаметром 1 м на круговых орбитах [23]:

Высота круговой орбиты, км	200	250	300	350	400	500
Время существования, сутки	0,4	4	20	65	160	1010

Квазар 3C 273:	Квазар 3C 48:
Яркость M [13]	—26,5
$m_{\text{внз}}$ [21]	13
Энергия излучения [13], эрг/сек:	
оптического	$2 \cdot 10^{46}$
радио	10^{45}
Размер, пс	< 500 [19]
Масса [21], $M_{\odot}$	$2 \cdot 10^5$

Идентифицированные линии [13, 2 1, 24]:

Mg II (2798 Å);	Mg II (2798 Å);
H δ (4102 Å); H γ (4340 Å);	Ne V (2975 Å);
	Ne V (3346 Å);
H β (4861 Å); H α (6563 Å);	Ne V (3426 Å);
O III (5007 Å)	O II (3727 Å);
	Ne III (3869 Å)

Таблица 46.28

Время существования, сутки, спутника массой 100 кг и диаметром 1 м на эллиптических орбитах [23]:

Высота перигелия, км	Высота апогея, км				
	500	700	1000	1300	1600
200	9	18	37	58	82
230	25	52	102	165	237
260	53	116	238	370	535
300	114	260	545	890	1280
400	410	1120	2630	4450	6600

Таблица 46.29

Периоды обращения спутников Земли

Период обращения спутника зависит от средней высоты полета. В случае движения по круговой орбите скорость движения спутника постоянна и равна первой космической скорости на данной высоте [14].

Высота, км	Круговая скорость, м/сек	Период обращения, ч	Высота, км	Круговая скорость, м/сек	Период обращения, ч
0	7909	1,41	1 690	7032	2,00
250	7759	1,49	2 000	6901	2,12
500	7617	1,58	5 000	5921	3,35
750	7482	1,66	10 000	4935	5,78
1000	7354	1,75	35 800	3072	23,935
1500	7116	1,93			

Таблица 46.30

Значения минимально необходимых скоростей для полета к планетам [14] (высота участка выведения 200 км)

Планета	Скорость в конце участка выведения, км/сек	Продолжительность полета до встречи с планетой, год	Планета	Скорость в конце участка выведения, км/сек	Продолжительность полета до встречи с планетой, год
Меркурий	13,31	0,29	Сатурн	15,03	6,04
Венера	11,25	0,40	Уран	15,73	16,0
Марс	11,35	0,71	Нептун	16,00	30,6
Юпитер	14,05	2,72			

46.8. КОСМИЧЕСКАЯ РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ

Атомные массы элементов, приведенные в табл. 46.31, даны в шкале, в которой за единицу принята 1 а. е. м., равная массе 1/12 атома ^{12}C (см. разд. 1.6). Множитель перехода к физической шкале равен 1,000300. В последней колонке приведен десятичный логарифм космической распространенности элементов [7]. Все значения даны относительно водорода, для которого принято $\lg N = 12,00$. Значения даны для числа атомов естественной смеси изотопов.

Таблица 46.31

Космическая распространенность элементов

Атомный номер	Элемент	Атомная масса, а. е. м.	$\lg N$
1	H	1,00797	12,00
2	He	4,0026	11,21
3	Li	6,939	3,50
4	Be	9,0122	2,80
5	B	10,811	2,88
6	C	12,01115	8,60
7	N	14,0067	8,05
8	O	15,9994	8,95
9	F	18,9984	6,0
10	Ne	20,183	8,70
11	Na	22,9898	6,30
12	Mg	24,312	7,40
13	Al	26,9815	6,22
14	Si	28,086	7,50
15	P	30,9738	5,40
16	S	32,064	7,35
17	Cl	35,453	6,25
18	Ar	39,948	6,88
19	K	39,102	4,82
20	Ca	40,08	6,19
21	Sc	44,956	2,85
22	Ti	47,90	4,89
23	V	50,942	3,82
24	Cr	51,996	5,38
25	Mn	54,9380	5,12
26	Fe	55,847	6,57
27	Co	58,9332	4,75
28	Ni	58,71	5,95
29	Cu	63,54	4,50
30	Zn	65,37	4,28
31	Ga	69,72	2,45
32	Ge	72,59	3,20
33	As	74,9216	2,11
34	Se	78,96	3,33
35	Br	79,909	2,65
36	Kr	83,80	2,21
37	Rb	85,47	2,35
38	Sr	87,62	2,70
39	Y	88,905	2,45
40	Zr	91,22	2,50
41	Nb	92,906	1,50
42	Mo	95,94	1,88
43	Tc	99	-0,6 [1]
44	Ru	101,07	1,44
45	Rh	102,905	0,8
46	Pd	106,4	1,26
47	Ag	107,870	0,82
48	Cd	112,40	1,45
49	In	114,82	0,75
50	Sn	118,69	1,57
51	Sb	121,75	0,95
52	Te	127,60	2,05
53	J	126,9044	1,35
54	Xe	131,30	2,06
55	Cs	132,905	1,16
56	Ba	137,34	2,08
57	La	138,91	1,10
58	Ce	140,12	1,29
59	Pr	140,907	0,66
60	Nd	144,24	1,36
61	Pm	147	0,2 [1]
62	Sm	150,35	0,89
63	Eu	151,96	0,48
64	Gd	157,25	1,05

Атомный номер	Элемент	Атомная масса, а. е. м.	μR_N
65	Tb	158,924	0,25
66	Dy	162,50	1,08
67	Ho	164,930	0,39
68	Er	167,26	0,84
69	Tm	168,934	0,08
70	Yb	173,04	0,78
71	Lu	174,97	0,06
72	Hf	178,49	0,4
73	Ta	180,948	0,75
74	W	183,85	0,6
75	Re	186,2	0,9
76	Os	190,2	1,4
77	Ir	192,2	1,2
78	Pt	195,09	1,7
79	Au	196,967	0,66
80	Hg	200,59	0,75
81	Tl	204,37	0,55
82	Pb	207,19	1,50
83	Bi	208,980	0,5
84	Po	210	—
85	At	211	—
86	Rn	222	—10,3 [1]
87	Fr	223	—
88	Ra	226,12	—5,2 [1]
89	Ac	227	—9,6 [1]
90	Th	232,038	0,00
91	Pa	231	—7,6 [1]
92	U	238,03	—0,30
93	Np	237	—
94	Pu	242	—

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аллен К. У. Астрофизические величины. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
2. Allen C. W. Astrophysical Quantities. 2nd ed., Lond., Univ. of London, 1963.
3. Курс астрофизики и звездной астрономии. Под ред. А. А. Михайлова. М., «Наука», т. 2, 1962; т. 3, 1964; т. 1, 1973.

4. Бок Б., Бок П. Млечный путь. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1959.
5. Франк-Каменецкий Д. А. Физические процессы внутри звезд. М., Физматгиз, 1959.
6. Аллер Л. Астрофизика. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1955.
7. Аллер Л. Распространенность химических элементов. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
8. Стайнберг Ж., Леку Ж. Радиоастрономия. Пер. с франц. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
9. Смит Г. Радиоастрономия. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
10. Рессел Г. Н., Дэган Р. С., Стюарт Д. К. Астрономия. Пер. с англ. М.—Л., ОНТИ, 1935.
11. Справочник по космонавтике. Под ред. Н. Я. Кондратьева и В. А. Одинцова. М., Изд-во Мин-ва обороны СССР, 1966.
12. Корец М. А. «Природа», 1966, т. 11, с. 54; 1968, т. 4, с. 119.
13. Агекян Т. А. Звезды, галактики, Метагалактика. М., «Наука», 1966.
14. Александров С. Г., Федоров Р. Е. Советские спутники и космические корабли. М., Изд-во АН СССР, 1961.
15. «Правда», 8 сентября 1972 г.; Маров М. Я. «Природа», 1972, т. 10, с. 9.
16. Корец М. А., Понизовский З. Л. «Природа», 1970, т. 7, с. 35.
17. Гольдберг Л., Аллер Л. Атомы, звезды и туманности. М.—Л., Гостехиздат, 1948.
18. Кукаркин Б. В. и др. Общий каталог переменных звезд. М., Изд-во АН СССР, 1958.
19. Воронцов-Вельяминов Б. А. Виегалактическая астрономия. М., «Наука», 1972.
20. «Природа», 1971, т. 1, с. 92.
21. Гринштейн Д. Л. В сб.: «Астрофизика». Пер. с англ. М., «Наука», 1967, с. 152.
22. Гинзбург В. Л. «Наука и жизнь», 1968, т. 3, с. 50.
23. Охотимский Д. Е. «Успехи физ. наук», 1957, т. 58, с. 33.
24. Ефремов Ю. Н. «Природа», 1964, т. 2, с. 32.
25. Бербидж М., Бербидж Д. См. [21], с. 169.
26. Шкловский И. С. Космическое радиоизлучение. М., Физматгиз, 1956.
27. «Природа», 1972, т. 9, с. 104.
28. Кондратьев К. Я. Погода и климат на планетах. М., «Знание», 1975.

ГЛАВА 47

ГЕОФИЗИКА

47.1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕМЛИ

Фигура Земли

В 1967 г. на съезде Международной Ассоциации Геодезии в Швейцарии была принята «Геодезическая система 1967» со следующими характеристиками Земли:

Экваториальный радиус Земли $a = 6378160 \text{ м}$
 Геоцентрическая гравитационная постоянная Земли (включая атмосферу) $GM = 398603 \cdot 10^9 \text{ м}^2/\text{сек}^2$

Динамический коэффициент формы Земли $I = 0,0010827$
 Угловая скорость вращения Земли $\omega = 7,2921151467 \times 10^{-5} \text{ рад/сек}$
 Отношение массы атмосферы к массе Земли . . . $\mu_a = 0,000001$

Этой системе соответствуют следующие параметры Земли:

Геометрические

Большая полуось $a = 6378160 \text{ м}$
 Малая полуось $b = 6356774,5161 \text{ м}$
 Линейный эксцентриситет . $E = 521864,6732 \text{ м}$
 Полярный радиус кривизны $c = 6399617,4290 \text{ м}$

e — первый эксцентриситет
 e' — второй эксцентриситет
 Сжатие
 Обратное сжатие
 Средний радиус
 Радиус сферы равной площади
 Радиус сферы равного объема

$e^2 = 0,00669460532856$
 $e'^2 = 0,00673972512832$
 $f = (a - b)/a = 0,00335292371299$
 $1/f = 298,247167427$
 $R_1 = (2a + b)/3 = 6371031,5054 \text{ м}$
 $R_2 = 6371029,9148 \text{ м}$
 $R_3 = 6371023,5234 \text{ м}$

Физические

Нормальный потенциал эллипсоида
 Коэффициенты сферических гармоник разложения потенциала в ряд:
 $J_2 = 0,0011827$;
 $J_4 = -0,00000237126440$;
 Нормальное ускорение силы тяжести на экваторе . . .
 Нормальное ускорение силы тяжести на полюсе
 $f^* = (\gamma_p - \gamma_e)/\gamma_e = 0,00530236552330$
 $k = (b\gamma_p - a\gamma_e)/(a\gamma_e) = 0,00193166338321$

$U_0 = 6263703052,3 \frac{\text{см}}{\text{сек}^2} \text{ м}$
 $J_6 = 0,00000000608516$
 $J_8 = -0,0000000001428$
 $\gamma_e = 978,03184558 \text{ см/сек}^2$
 $\gamma_p = 983,21772792 \text{ см/сек}^2$

В СССР в 1946 г. принят эллипсоид Красовского с параметрами:

Экваториальный радиус
 Полярный радиус
 Сжатие
 Площадь поверхности эллипсоида
 Объем эллипсоида
 Средний радиус равновесной сферы
 Средняя плотность Земли . .
 Масса Земли, имеющей плотность ρ , ...

$a = 6378245 \text{ м}$
 $b = 6356863 \text{ м}$
 $f = 1/298,3$
 $5,10 \cdot 10^8 \text{ км}^2$
 $1,083 \cdot 10^{12} \text{ км}^3$
 $R_1 = 6371110 \text{ м}$
 $\rho = 5,517 \text{ г/см}^3$
 $M = 5,975 \cdot 10^{27} \text{ г}$

Строение Земли

Форма Земли, близкая к эллипсоиду вращения, указывает на то, что вещество Земли находится в гидростатическом равновесии по отношению к действующим на него силам (притяжения и центробежным), т. е. ведет себя по отношению к длительно действующим силам как жидкое тело [3, 4]. По оценкам, вязкость Земли равна 10^{23} лз .

В то же время модуль сдвига, определенный для Земли в целом по кратковременным воздействиям (землетрясения, приливы и перемещения масс в атмосфере и т. п.), составляет около $15 \cdot 10^{11} \text{ дин/см}^2$. Таким образом, земной шар является вязко-упругим телом с периодом релаксации $\tau \approx 10^{10} \text{ сек}$.

Упругие свойства внутри Земли изменяются на некоторых определенных глубинах скачком и плавно в пределах слоев, разделенных этими границами. Важнейшими границами являются поверхность Мохоровичича, залегающая на глубине 10—70 км, и поверхность Вихерта — Гутенберга на глубине 2900 км, резко преломляющая продольные упругие волны и не пропускающая поперечных волн. Эти границы разделяют земной шар на три главные зоны: ядро, мантию и кору. Кора обладает наибольшей жесткостью, мантия характеризуется высокой вязкостью, а ядро находится в состоянии, близком к жидкому, и реагирует лишь на продольные волны изменением своего объема. Внутри трех главных зон земного шара имеются менее четко выраженные границы.

Внутреннее строение Земли оценивается по известной ее массе, моменту инерции земного шара и на основе изучения упругих волн от землетрясений [4]. Получено, что плотность вещества в центре Земли $\rho_c \gg 12,2 \text{ г/см}^3$ и ядро Земли отделено от вышележащих слоев на глубине 2900 км резким скачком плотности, порядка 4 г/см^3 . Скачкообразные изменения плотности с глубиной могут быть вызваны изменением как вещественного состава пород, так и их фазового состояния.

Кора континентов в 3—10 раз толще коры океана [5]. Толщина коры континентов различна на платформах (30—40 км) и в геосинклиналях (40—80 км). В зонах самых высоких гор Памира и Гималаев она достигает 70—80 км. Нижняя граница коры — граница Мохоровичича M — в этих областях образует корни гор, которые глубоко (на 30—40 км) по сравнению с платформенными равнинными районами внедряются в мантию. Кора океанов — тонкая, около 4—8 км. Граница M залегает здесь на глубине 10—15 км. Разность глубин границы M на континентах и в океанах составляет 20—50 км. Средняя плотность коры на континентах $2,7 \text{ — } 2,8 \text{ г/см}^3$, под океанами — $2,9 \text{ г/см}^3$. Плотность верхней мантии $3,3 \text{ — } 3,4 \text{ г/см}^3$. Кора как бы плавает в более тяжелой мантии. На континентах поверхность мантии образует впадины, в океанах — огромные выступы. Земная кора континентов и океанов различается по значениям скоростей распространения упругих волн. Кора океанов не содержит слоев со скоростью распространения продольных волн $\sim 6 \text{ км/сек}$, характерных для коры континентов.

В земной коре различают два главных слоя: осадочный, состоящий из пород, залегающих почти горизонтально, и консолидированный, или кристаллический. Скорости распространения упругих волн в осадочных породах имеют широкие пределы, но в толстых слоях обычно не превышают 5 км/сек . Консолидированной части коры свойственны скорости свыше 6 км/сек (на континентах в верхней части консолидированной коры скорости близки к 6 км/сек , в нижней — к 7 км/сек ; на океанах $6,5 \text{ — } 7 \text{ км/сек}$).

Суммарная масса [6] главных элементов земной коры, которая делится на литосферу, гидросферу, биосферу и атмосферу, распределяется следующим образом:

Элемент земной коры	Масса, 10^{15} т
Литосфера	2300
Гидросфера	1644
Атмосфера	5,1
Биосфера	0,01

47.2. ЛИТОСФЕРА

Состав

Литосфера состоит из осадков и кристаллических пород. В пределах литосферы различают [6] два резко различных региона: глубинная океаническая область (площадь 268 млн. км^2 , средняя глубина ниже уровня моря 4,5 км, мощность слоя 6 км) и область континентального щита (площадь 105 млн. км^2 , средняя высота над уровнем моря 0,75 км, мощность 35,05 км). Различают две переходные области, химически промежуточные между составом этих регионов: область молодых складчатых поясов (площадь 42 млн. км^2) и субокеаническую область (площадь 93 млн. км^2). Остаточные 2 млн. км^2 суши в основном представляют собой вулканические острова.

Таблица 47.1

Плотность, сила тяжести и давление
внутри Земли [4]

Глубина, км	Плотность ρ , г/см ³	Сила тяжести g, см/сек ²	Давление P, 10 ¹² дин/см ²
0	2,76	980	0,000
33	2,85	983	0,009
33	3,32	983	0,009
80	3,36	984	0,025
80	3,87	984	0,025
200	3,94	983	0,071
400	4,06	981	0,149
800	4,30	977	0,313
1200	4,52	974	0,485
2400	5,13	1010	1,056
2900	9,74	1068	1,330
3600	10,72	913	2,02
4800	11,87	632	3,06
5400	16,16	457	3,53
6000	17,65	184	3,85
6371	17,90	0	3,92

Таблица 47.2

Космогонический возраст Земли [3]

Использованный метод	Оценка возраста, млн. лет	Начальные условия
По приливному трению	2000—4000	Луна на ближайшем расстоянии от Земли
По содержанию натрия в океанах	> 180	Образование океанов
По осадконакоплению	> 350	То же
По солнечному излучению	> 20	Образование Солнца
По температуре в земной коре	> 20	Образование Земли
По радиоактивности горных пород	> 3000	Кристаллизация древних пород
По отношению свинец/уран в земной коре	< 4000	Образование земной коры
По содержанию ²³⁸ U	< 5000	То же
По содержанию свинцовых руд	4500 ± 300	» »

Таблица 47.3

Абсолютная шкала геологического летоисчисления [2]

Эра	Эпоха	Млн. лет назад
Кайнозой	Новейшая	0—10 000 лет
	Плейстоцен	10
	Плиоцен	15
	Миоцен	30
	Олигоцен	40
	Эоцен	50
	Палеоцен	60

Продолжение табл. 47.3

Эра	Эпоха	Млн. лет назад
Мезозой	Верхнемеловая	80
	Нижнемеловая	125
	Юрская	160
	Триасовая	200
Палеозой	Пермская	250
	Пенсильванская	280
	Миссисипская	310
	Девонская	350
	Силурийская	410
	Ордовикская	470
	Кембрийская	550
Протерозой	Позднедокембрийская	1,6 · 10 ³
Архей		3,6 · 10 ³
	Породы до образования земной коры	4,5 · 10 ³

Таблица 47.4

Средний химический состав литосферы [5]

Соединение	Масса, 10 ¹⁵ т	Содержание, %	Соединение	Масса, 10 ¹⁵ т	Содержание, %
SiO ₂	13 050	55,2	Fe ₂ O ₃	661	2,8
Al ₂ O ₃	3 629	15,3	K ₂ O	452	1,9
CaO	2 082	8,8	TiO ₂	385	1,6
FeO	1 381	5,8	P ₂ O ₅	62,0	0,3
MgO	1 234	5,2	MnO	42,6	0,2
Na ₂ O	682	2,9			

Таблица 47.5

Основные физические свойства горных пород [7]

Свойство	Пределы значений для горных пород	
	магматических и метаморфических	осадочных
Плотность, г/см ³	2,5—3,3	1,9—2,9
Пористость, %	до 10	до 40
Магнитная восприимчивость, 10 ⁻⁶ ед. СГСМ	100—4000	до 600
Остаточное намагничивание, 10 ⁻⁶ ед. СГСМ	до 4000	—
Модуль Юнга, 10 ¹¹ Г/см ²	5—30	2,5—12
Коэффициент Пуассона	0,21—0,28	0,23—0,27
Скорость распространения продольных колебаний, км/сек	4,9—10,1	0,5—5,9

Свойство	Пределы значений для горных пород	
	магматических и метаморфических	осадочных
Удельное электрическое сопротивление, $\text{ом} \cdot \text{м}$	400—100 000	0,3—5000
Коэффициент теплопроводности, $\text{ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$	0,1—2,5	0,9—2,6
Удельная теплоемкость, $\text{кал}/(\text{г} \cdot \text{град})$	0,12—0,28	0,16—0,23

Таблица 47.6

Распространенность химических элементов в земной коре [8, 9]

Атомный номер	Элемент	Массовое содержание, %	Атомный номер	Элемент	Массовое содержание, %
1	Водород	1,00	42	Молибден	$1 \cdot 10^{-3}$
2	Гелий	$1 \cdot 10^{-6}$	44	Рутений	$5 \cdot 10^{-6}$
3	Литий	$5 \cdot 10^{-3}$	45	Родий	$1 \cdot 10^{-6}$
4	Бериллий	$4 \cdot 10^{-4}$	46	Палладий	$5 \cdot 10^{-6}$
5	Бор	$5 \cdot 10^{-3}$	47	Серебро	$5 \cdot 10^{-6}$
6	Углерод	0,35	48	Кадмий	$5 \cdot 10^{-4}$
7	Азот	0,04	49	Индий	$1 \cdot 10^{-5}$
8	Кислород	49,13	50	Олово	$8 \cdot 10^{-3}$
9	Фтор	0,08	51	Сурьма	$5 \cdot 10^{-5}$
10	Неон	$5 \cdot 10^{-7}$	52	Теллур	$1 \cdot 10^{-6}$
11	Натрий	2,40	53	Иод	$1 \cdot 10^{-4}$
12	Магний	2,35	54	Ксенон	$3 \cdot 10^{-9}$
13	Алюминий	7,45	55	Цезий	$1 \cdot 10^{-3}$
14	Кремний	26,00	56	Барий	0,05
15	Фосфор	0,12	57	Лантан	$6,5 \cdot 10^{-4}$
16	Сера	0,10	58	Церий	$2,9 \cdot 10^{-3}$
17	Хлор	0,20	59	Празеодим	$4,5 \cdot 10^{-4}$
18	Аргон	$4 \cdot 10^{-4}$	60	Неодим	$1,7 \cdot 10^{-3}$
19	Калий	2,35	62	Самарий	$7 \cdot 10^{-4}$
20	Кальций	3,25	63	Европий	$2 \cdot 10^{-5}$
21	Скандий	$6 \cdot 10^{-4}$	64	Гадолиний	$7,5 \cdot 10^{-4}$
22	Титан	0,61	65	Тербий	$1 \cdot 10^{-4}$
23	Ванадий	0,02	66	Диспрозий	$7,5 \cdot 10^{-4}$
24	Хром	0,03	67	Гольмий	$1 \cdot 10^{-4}$
25	Марганец	0,10	68	Эрбий	$6,5 \cdot 10^{-4}$
26	Железо	4,20	69	Тулий	$1 \cdot 10^{-4}$
27	Кобальт	$2 \cdot 10^{-3}$	70	Иттербий	$8 \cdot 10^{-4}$
28	Никель	0,02	71	Лютеций	$1,7 \cdot 10^{-4}$
29	Медь	0,01	72	Гафний	$4 \cdot 10^{-4}$
30	Цинк	0,02	73	Тантал	$2,4 \cdot 10^{-5}$
31	Галлий	$1 \cdot 10^{-4}$	74	Вольфрам	$7 \cdot 10^{-3}$
32	Германий	$4 \cdot 10^{-4}$	75	Рений	$1 \cdot 10^{-7}$
33	Мышьяк	$5 \cdot 10^{-4}$	76	Осмий	$5 \cdot 10^{-6}$
34	Селен	$8 \cdot 10^{-5}$	77	Иридий	$1 \cdot 10^{-6}$
35	Бром	$1 \cdot 10^{-3}$	78	Платина	$2 \cdot 10^{-5}$
36	Криптон	$2 \cdot 10^{-8}$	79	Золото	$5 \cdot 10^{-7}$
37	Рубидий	$8 \cdot 10^{-3}$	80	Ртуть	$5 \cdot 10^{-6}$
38	Стронций	0,035	81	Таллий	$1 \cdot 10^{-5}$
39	Иттрий	$5 \cdot 10^{-3}$	82	Свинец	$1,6 \cdot 10^{-3}$
40	Цирконий	0,025	83	Висмут	$1 \cdot 10^{-5}$
41	Ниобий	$3,2 \cdot 10^{-5}$	84	Торий	$1 \cdot 10^{-3}$
			85	Уран	$4 \cdot 10^{-4}$

Сила тяжести на поверхности Земли [4]. Основные элементы гравитационного поля Земли — его потенциал, первые и вторые производные — относятся к прямоугольной системе координат с направлениями осей: x — на север, y — на восток, z — вниз, по направлению отвесной линии. Гравитационный потенциал W выражается в эрг , а для его первой $g_z = dW/dz$ и вторых производных ($W_{xx}, W_{yy}, W_{zz}, \dots$) введены специальные наименования единиц измерения. Для ускорения силы тяжести: 1 гал — 1 $\text{см}/\text{сек}^2$. Вторые производные потенциала измеряются в этивеш , иногда этивеш обозначается буквой E : 1 $\text{этивеш} = 10^{-9} \text{сек}^2$.

Сила тяжести на поверхности Земли определяется первой производной гравитационного потенциала по направлению внутренней нормали (ускорением силы тяжести) и представляет собой сумму сил гравитационного притяжения Земли и центробежной силы инерции.

Значения вторых производных потенциала силы тяжести на поверхности эллипсоида Красовского выражаются формулами:

$$W_{yy} - W_{xx} = W_{\Delta} = 5,1 [1 + \cos 2\varphi] \text{ этивеш};$$

$$W_{xz} = 8,1 \sin^2 \varphi \text{ этивеш}$$

Таблица 47.7

Зависимость силы тяжести g от широты места φ на поверхности эллипсоида Красовского [10 — 12]

φ , град	g , $\frac{\text{см}}{\text{сек}^2}$	φ , град	g , $\frac{\text{см}}{\text{сек}^2}$	φ , град	g , $\frac{\text{см}}{\text{сек}^2}$
0	978,0300	30	979,3213	60	981,9141
5	978,0692	35	979,7299	65	982,2853
10	978,1855	40	980,1659	70	982,6061
15	978,3756	45	980,6159	75	982,8665
20	978,6337	50	981,0663	80	983,0257
25	978,9521	55	981,5034	85	983,1759
				90	983,2360

Таблица 47.8

Нормальные значения внешнего и внутреннего вертикального градиента силы тяжести на поверхности международного эллипсоида 1924 г. [10, 12]

Широта φ , град	$W_{zz}^{\text{внут}}$, этивеш	$W_{zz}^{\text{внеш}}$, этивеш
20	3087,23	849,30
30	3086,63	848,70
40	3085,89	847,96
50	3085,10	847,17
60	3084,36	846,43
70	3083,76	845,83

Вариации силы тяжести [4]. Периодические изменения силы тяжести на поверхности Земли, обусловленные влиянием Луны, составляют до $2,49 \cdot 10^{-4}$ см/сек², когда Луна находится в зените. Амплитуда солнечного приливного действия составляет $9,6 \cdot 10^{-5}$ см/сек², так что суммарное влияние Луны и Солнца на силу тяжести достигает $3,45 \cdot 10^{-4}$ см/сек².

Амплитуда приливных изменений силы тяжести зависит от широты места наблюдения и уменьшается к высоким широтам.

Сейсмология

Сейсмичность Земли [15]. Накопление упругих напряжений в тектонически активных местах земной коры вызывает тектонические землетрясения. К ним относятся подавляющее большинство землетрясений, в том числе все катастрофические. Причиной землетрясений могут быть также вулканические процессы: извержения, взрывы газа и т. п.

Вулканические землетрясения сравнительно редки, слабы, носят локальный характер. На глубинах 50 — 700 км возникают очень сильные глубоководные, или плутонические, землетрясения.

Упругие волны в Земле [13]. Распространение упругих деформаций при землетрясениях носит волновой характер. Обычно исследуются продольные *P* и поперечные *S* объемные волны, а также поверхностные — волны Рэлея *R*, у которых колебание частиц происходит в плоскости, перпендикулярной к поверхности и проходящей через направление сейсмического луча, и поперечные поверхностные волны Лява *L*.

Скорость сейсмических волн возрастает с глубиной, причем на верхней границе земной коры скорость продольных волн 7,8—8,0 км/сек, а поперечных 4,3—4,4 см/сек. После очень небольшого уменьшения скорости на глубине около 80—100 км она вновь растет с глубиной. Особенно большой рост скорости продольных и поперечных волн наблюдается на глубине порядка 400—600 км (с 9 до 10 км/сек). К этим глубинам приурочен максимум частоты глубоких землетрясений. Начиная с 900 км и до границы ядра рост скорости замедляется. На границе ядра скорость продольных волн составляет 13,6 км/сек, а поперечных 7,3—7,4 км/сек.

На границе ядра скорость продольных волн падает скачком до 7,8—8,0 км/сек и снова растет с глубиной: после довольно резкого изменения скорости на глубине около 5000 км она остается постоянной и в центре Земли достигает 11,2—11,3 км/сек.

Поперечные волны через земное ядро не проходят. Землетрясения [14]. Для характеристики силы землетрясений используется главным образом степень повреждения зданий и сооружений; кроме того, учитываются остаточные явления в грунтах, субъективные ощущения и т. п.

Интенсивность землетрясений выражается в магнитудах *M* — величинах, определяемых по записям объемных или поверхностных волн на сейсмических станциях [13]. Определения магнитуд относятся к землетрясениям, очаги которых залегают на глубине 20—30 км.

Землетрясение, энергия которого принята за единицу (*M* = 0) расходует энергию около 10^{12} эрг. Наиболее сильные землетрясения не превосходят *M* = 8,5, что соответствует энергии до 10^{27} эрг. Прирост интенсивности на 0,5 *M* соответствует увеличению энергии примерно в 10 раз.

Таблица 47.9

Шкала землетрясений, принятая в СССР в 1952 г.

Эта шкала основана на максимальной амплитуде смещения маятника, параметры которого (период собственных колебаний 0,25 сек и логарифмический декремент затухания 0,50) соответствуют характеристикам зданий, имеющих массовое распространение.

Балл	Наименование	Смещение [15], мм	Ускорение [11], мм/сек ²	Характеристика
1	Незаметное	—	2,5	Колебания почвы отмечаются приборами (микросейсмы)
2	Очень слабое	—	2,5—5,0	Иногда ощущаются людьми
3	Слабое	—	5—50	Колебания отмечаются немногими людьми
4	Умеренное	0,5	10—15	Отмечаются многими людьми. Возможно колебание окон, дверей
5	Довольно сильное	0,5—1	25—230	Качания висящих предметов, скрип полов, осыпание побелки
6	Сильное	1,1—2	50—100	Легкие повреждения в зданиях: тонкие трещины в штукатурке, трещины в печах и т. д.
7	Очень сильное	2,1—4	100—250	Значительные повреждения в зданиях: откалывание отдельных кусков штукатурки, тонкие трещины в стенках
8	Разрушительное	4,1—8	250—500	Разрушения в зданиях: большие трещины в стенах, падение карнизов, дымовых труб
9	Опустошительное	8,1—16	500—1000	В некоторых зданиях обвалы: падение стен, перекрытий, кровли
10	Уничтожающее	16,1—32	1000—2500	Обвалы во многих зданиях, трещины в грунте около метра шириной
11	Катастрофическое	> 32	2500—5000	Многочисленные трещины на поверхности Земли, большие обвалы в горах
12	Сильная катастрофа	—	> 500	Изменение рельефа в больших размерах

Частота землетрясений на Земле [13]

Характеристика землетрясения	Интенсивность, M	Число в год
Катастрофическое	7,8 и выше	1
Опустошительное	7,0—7,7	10
Разрушительное	6,0—6,9	100
Очень сильное	5,0—5,9	1 000
Сильное	4,0—4,9	10 000
Умеренное	3,0—3,9	100 000

Микросейсмические колебания [17, 18]. Микросейсмические колебания, микросейсмы 1-го рода — глобальное явление, связанное с деятельностью циклонов над водными бассейнами. Периоды их заключены в диапазоне 1—12 сек; в основном большим периодам соответствуют большие амплитуды. Непрерывные колебания поверхности имеют синусоидальную или неправильную форму с сезонными изменениями интенсивности. Значения смещений колеблются от 0,3 до 4,5 мкм.

Микросейсм 2-го рода вызваны поверхностными явлениями (транспорт, промышленные предприятия, лес, прибой и т. п.); они имеют периоды от 0,001 до 0,1 сек, зависят от грунтовых условий и быстро убывают с удалением от источника. Амплитуды смещений лежат в диапазоне $\sim 10^{-4}$ — $5 \cdot 10^{-2}$ мкм.

Земной магнетизм

Магнитное поле Земли характеризуется вектором напряженности T и выражается в эрстедах (э) или гаммах (γ) ($1\gamma = 10^{-5}$ э). Проекция вектора T на ось прямоугольной системы координат образует составляющие геомагнитного поля; z — вертикальную, x — северную, y — восточную. Часто применяется также горизонтальная $H = \sqrt{x^2 + y^2}$ составляющая.

Угол между горизонтальным направлением H и географическим меридианом называется склонением D , а угол, образуемый вектором напряженности с горизонтальной плоскостью, — наклонением J .

Постоянное магнитное поле Земли [16, 19]. Географическое распределение постоянного магнитного поля соответствует полю однородно намагниченной сферы с координатами полюсов: северного (в Южном полушарии) $\varphi = 71,2^\circ$, $\lambda = 150,8^\circ$ и южного (в Северном полушарии) $\varphi = 70,5^\circ$, $\lambda = 264^\circ$. Линия, соединяющая магнитные полюса, наклонена относительно географической оси на $11,5^\circ$ и смещена от центра Земли на 1140 км в сторону Тихого океана.

Напряженность магнитного поля на магнитном полюсе 0,65 э, напряженность магнитного поля на магнитном экваторе 0,35 э. Градиенты вертикальной dz/dh и горизонтальной $d\varphi/d\varphi$ составляющих магнитного поля по высоте h и широте φ для широты Ленинграда равны:

$$\frac{dz}{dh} = -23,5 \gamma/\text{км}; \quad \frac{d\varphi}{d\varphi} = 250 \gamma/\text{град} = 2,5 \gamma/\text{км};$$

$$\frac{dH}{dh} = -7,5 \gamma/\text{км}; \quad \frac{dH}{d\varphi} = -400 \gamma/\text{град} = -4,0 \gamma/\text{км}.$$

Магнитный момент однородно намагниченного земного шара [20] $M = 8,3 \cdot 10^{25}$ ед. СГСМ.

Элементы постоянного магнитного поля Земли изменяются на ее поверхности в следующих пределах [21].

Полный вектор напряженности поля

от +0,62 до —0,73 э

Горизонтальная составляющая . . . от 0 до 0,41 э

Вертикальная составляющая . . . от +0,62 до —0,73

Магнитное склонение от —180 до +180°

Магнитное наклонение от —90 до +90°

Географическое распределение постоянного магнитного поля Земли с учетом магнитных аномалий площадью от нескольких километров до целых материков изображается в виде карт. Карта составляющих напряженности магнитного поля приведена на рис. 47.1.

Вековые вариации геомагнитного поля [4]. Средние значения элементов геомагнитного поля изменяются со временем. Сравнение элементов поля для 1885 и 1950 г. приводит к выводу, что полиный магнитный момент Земли уменьшается в течение года приблизительно на $7 \cdot 10^{-4}$ своего значения. Следовательно, короткий в геологическом отношении отрезок времени достаточен, чтобы полностью изменить всю картину геомагнитного поля.

Переменное магнитное поле Земли. Периодические вариации. Все периодические вариации магнитного поля Земли имеют источники вне Земли. Вариации классифицируют по длине периода, что является одновременно классификацией по физическим причинам. Выделяются солнечно-суточные вариации, вызванные суточным движением Земли вокруг Солнца, лунно-суточные, годовые, циклические вариации с периодом 11 лет, связанные с изменением солнечной активности и т. п. Амплитуды всех периодических вариаций, кроме солнечно-суточных, составляют единицы угловых минут склонения и единицы гамм напряженности поля.

Непериодические вариации магнитного поля Земли. Магнитные бури [21]. Магнитные бури и общая магнитная активность вызываются взаимодействием корпускулярного излучения Солнца с постоянным магнитным полем Земли. Магнитные бури — резкие, неправильной формы колебания магнитного поля Земли начинаются одновременно на всем земном шаре и имеют тенденцию к повторению через 27 суток. Поле изменяется по величине и направлению на несколько процентов за время от нескольких часов до нескольких суток.

Земные теллурические токи [22, 23]. Токи и переменное геомагнитное поле — явления, связанные между собой. Плотность теллурических токов j для различных участков земной поверхности приблизительно одинакова $j = 2 \text{ а/км}^2$. Интенсивность теллурических токов возрастает от низких широт к высоким. На низких широтах напряженность поля обычно не превышает десятков милливольт на километр. В полярных странах напряженность может достигать единиц и даже десятков вольт на километр; наиболее сильны теллурические токи во время магнитных бурь.

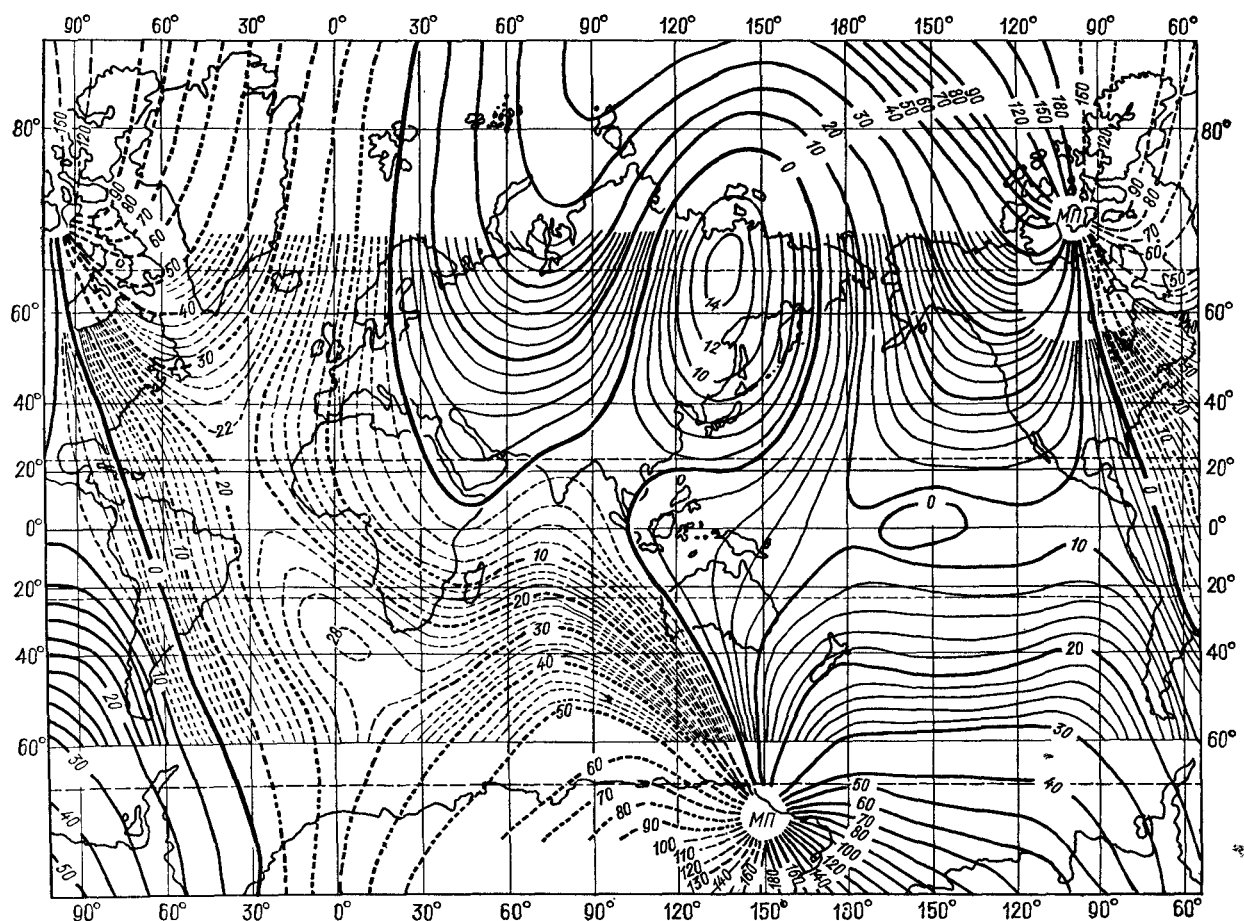


Рис. 47.1. Напряженность магнитного поля Земли T , мТ, на 1965 г. [32].

Таблица 47.11

Суточно-суточные вариации геомагнитного поля [21]

Составляющая напряженности	Годы низкой магнитной активности				Годы высокой магнитной активности			
	Средние широты		Высокие широты		Средние широты		Высокие широты	
	Спокойные дни	Возмущенные дни	Спокойные дни	Возмущенные дни	Спокойные дни	Возмущенные дни	Спокойные дни	Возмущенные дни
Горизонтальная H , $0,8 \cdot 10^{-3}$ а/м	7—40	18—58	44—80	90—402	8—74	25—109	27—77	50—460
Вертикальная z , $0,8 \cdot 10^{-3}$ а/м	4—16	9—36	20—90	103—305	6—26	14—128	15—70	128—315
Модуль полного вектора, $0,8 \cdot 10^{-3}$ а/м	6—26	11—64	20—65	150—300	8—35	13—104	35—110	230—275

Температура внутри Земли [4, 24]. У поверхности Земли температура почвы и неглубоко залегающих горных пород определяется балансом тепла, получаемого от Солнца и излучаемого в атмосферу. Роль терморегулятора играет водная и воздушная оболочка Земли. В среднем глубина проникновения суточных колебаний температуры почвы в зависимости от ее свойства и географических условий изменяется от 35 до 100 см. Запаздывание наступления экстремумов в среднем составляет 2—3 ч на каждые 10 см глубины.

Глубина проникновения годовых колебаний температуры составляет в низких широтах около 5—10 м, а в средних и высоких 8—24 м, доходя до 30 м.

Вековые изменения температуры проникают глубже 50 м и сохраняются надолго вследствие запаздывания температурной волны по фазе с глубиной. Вечная мерзлота, распространяющаяся местами до нескольких сот метров, является реликтом ледникового периода, миновавшего несколько десятков тысяч лет назад. Наблюдения в шахтах и буровых скважинах показывают постепенное увеличение температуры с глубиной. На глубине около 2800 м в Калифорнии температура достигает 120° С, в разведочных скважинах на Северном Кавказе зарегистрирована температура около 160° С на глубине 3200 м. Скорость изменения температуры с глубиной характеризуется величиной геотермического градиента или обратной ему величиной геотермической степени $m/град$. Значения dT/dh изменяются от 0,1 до 0,01 град/м. Для дна океана средние значения dT/dh порядка 0,08 град/м (для Тихого океана) и 0,04 град/м (для Северной Атлантики).

Средний поток тепла из недр Земли составляет около $1,2 \cdot 10^{-6}$ ккал/(см²·сек) с отклонениями от среднего до 50%. На суше измерения теплового потока дали значение $1,04 \cdot 10^{-6}$ (Англия) и $1,16 \cdot 10^{-6}$ ккал/(см²·сек) (Южная Африка). Средние значения потока тепла через дно океана $0,14 \cdot 10^{-6}$ — $8,09 \cdot 10^{-6}$ ккал/(см²·сек). Постоянным источником внутреннего тепла Земли являются радиоактивные элементы. Отмечено, что если бы радий был распределен равномерно до глубины в несколько десятков километров с такой же средней концентрацией, как в гранитах, то выделение тепла одним радием могло бы дать весь наблюдаемый тепловой поток Земли.

Таблица 47.12

Концентрация радиоактивных элементов в горных породах различных типов [33]

Порода	Концентрация, отн. ед.			
	²³⁸ U	²³⁵ U	²³² Th	⁴⁰ K
Гранит	2,9	2,1	0,1	3,1
Промежуточная	1,4	1,0	4,3	1,3
Базальтовая	0,9	0,65	3,2	1,1
Дунит	0,9	0,00	0,0	0,00

Из всех имеющихся сведений следует, что температура внутри Земли интенсивно возрастает до глубины 200 км, после чего ее рост с глубиной резко замедляется. Температура в центре Земли может быть оценена в 2000—4000° С, причем более вероятно нижнее значение.

Охлаждение глубинных слоев Земли в настоящее время идет медленно. Активной в термическом отношении зоной являются верхние слои Земли до глубины 100—200 км, особенно в областях распространения кислых изверженных и магматических пород.

Тепловой баланс Земли [31]. Земля ежегодно поглощает 168 ккал/см². Из них: 112 ккал/(см²·г) — земная поверхность; 56 ккал/(см²·г) — атмосфера Земли. Потеря земной поверхностью через длинноволновое эффективное излучение 40 ккал/(см²·г). Потери на испарение 59 ккал/(см²·г). Передача в атмосферу через турбулентную теплоотдачу 13 ккал/(см²·г).

47.3. ГИДРОСФЕРА

Распределение запасов воды на поверхности Земли [24]

Таблица 47.13

Запасы воды	Объем, км ³	Масса, Т
Океаны и моря	$1336 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^{18}$
Полярный лед	$3,5 \cdot 10^6$	$3,5 \cdot 10^{15}$
Озера	$2,5 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^{14}$
Подземные озера	$2,5 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^{14}$
Реки	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^{13}$
Болота	$6 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^{12}$
Снежный покров	250	$2,5 \cdot 10^{11}$
Полные запасы	$\sim 1340 \cdot 10^6$	$(1,8 \div 2,7) 10^{18}$

Влагооборот. Баланс влаги по поверхности Земли [24]. Общее количество воды, выпадающей за один год в виде осадков для всего земного шара оценивается в $5 \cdot 10^{14}$ Т, что в 40 раз больше общего содержания воды в атмосфере. По современным данным (с погрешностью до 10%), общее количество осадков, выпадающих на поверхность Мирового океана, дает в среднем слой осадков 102 см/год, что соответствует выпадению 370 000 км³ воды. Испарение с поверхности океана составляет 113 см/год или 407 000 км³ воды, и речной сток в океаны оказывается равным 10,3 см/год, или 37 000 км³.

Для поверхности суши с учетом стока в океан получены следующие значения: осадки 70,0 см/год (102000 км³), испарение 44,6 см/год (64900 км³) и сток 25,4 см/год (37000 км³). На долю частей суши, не имеющих стока в океан, приходится всего около 8000 км³ осадков и столько же на испарение. В целом для земного шара годовой слой осадков, равный годовой величине испарения, составляет 92,8 см/год (472000 км³), причем на сушу из общего количества осадков выпадает только 22%, а на океан 78%; испарение же с поверхности суши составляет 14% общего испарения, а остальные 86% испаряются с поверхности океана.

Большая часть воды (90%) содержится в нижнем слое атмосферы (до 8—10 км) и составляет 0,3—0,4% массы атмосферного воздуха в этом слое.

Основная часть воды в атмосфере находится в парообразном состоянии (около 95%), на долю облачных частиц (капель воды и кристаллов льда) приходится менее 5% массы воды, содержащейся в атмосфере.

Состав океанической и пресной воды

Вследствие большой ионизирующей способности воды растворенные в ней соли оказываются в ионно-дисперсной форме. Общее количество растворенных веществ в 1 л морской воды в граммах называется соленостью, выражается в промиллях и обозначается S , ‰. Существует связь между S , ‰, и хлорностью (содержанием хлора в морской воде):

$$S, ‰ = 0,03 + 1,805 \text{ Cl}, ‰$$

Средняя соленость морской воды S равна $34,85 ‰$, средняя хлорность Cl равна $19,37 ‰$.

Таблица 47.14

Средний химический состав океанической воды при $T = 5^\circ\text{C}$ и хлорности $19 ‰$ [25]

Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %
Кислород	85,94	Медь	$6 \cdot 10^{-7}$
Водород	10,80	Свинец	$4 \cdot 10^{-7}$
Хлор	1,898	Марганец	$4 \cdot 10^{-7}$
Натрий	1,056	Селен	$4 \cdot 10^{-7}$
Магний	$1,272 \cdot 10^{-1}$	Цезий	$2 \cdot 10^{-7}$
Сера	$8,84 \cdot 10^{-2}$	Уран	$1,5 \cdot 10^{-7}$
Кальций	$4,00 \cdot 10^{-2}$	Молибден	$5 \cdot 10^{-8}$
Калий	$3,80 \cdot 10^{-2}$	Галлий	$5 \cdot 10^{-8}$
Бром	$6,5 \cdot 10^{-3}$	Торий	$< 5 \cdot 10^{-8}$
Углерод	$3,0 \cdot 10^{-3}$	Никель	$3 \cdot 10^{-8}$
Азот	$1,7 \cdot 10^{-3}$	Ванадий	$3 \cdot 10^{-8}$
Стронций	$1,33 \cdot 10^{-3}$	Церий	$3 \cdot 10^{-8}$
Бор	$4,6 \cdot 10^{-4}$	Иттрий	$3 \cdot 10^{-8}$
Кремний	$> 2 \cdot 10^{-4}$	Лантан	$3 \cdot 10^{-8}$
Фтор	$1,3 \cdot 10^{-4}$	Криптон	$2,8 \cdot 10^{-8}$
Аргон	$6,1 \cdot 10^{-5}$	Висмут	$2 \cdot 10^{-8}$
Рубидий	$2 \cdot 10^{-5}$	Неон	$1,1 \cdot 10^{-8}$
Литий	$1 \cdot 10^{-5}$	Кобальт	$1 \cdot 10^{-8}$
Фосфор	$1 \cdot 10^{-5}$	Серебро	$1 \cdot 10^{-8}$
Иод	$5 \cdot 10^{-6}$	Ксенон	$9,4 \cdot 10^{-9}$
Барий	$5 \cdot 10^{-6}$	Скандий	$4 \cdot 10^{-9}$
Мышьяк	$1,5 \cdot 10^{-6}$	Ртуть	$3 \cdot 10^{-9}$
Цинк	$1 \cdot 10^{-6}$	Гелий	$5,2 \cdot 10^{-10}$
Алюминий	$1 \cdot 10^{-6}$	Золото	$5 \cdot 10^{-10}$
Железо	$1 \cdot 10^{-6}$	Радий	$(0,2 \div 3) \cdot 10^{-10}$

Таблица 47.15

Важнейшие вещества, растворенные в морской, озерной и речной водах [7]

Вещества, растворенные в морской воде			Вещества, растворенные в озерной и речной водах		
Ионы	Концентрация, г/м	Общая масса, 10^{12} т	Ионы	Концентрация, г/м	Общая масса, 10^{12} т
Cl^-	19 360	30 976	CO_2	51,2	1178
Na^{+1}	10 770	17 232	CO_3^{+2}	29,8	680
SO_4^{-2}	2 701	4 321	SO_4^{-2}	17,7	407
Mg^{+2}	1 298	2 077	SiO_2	17,1	393
Ca^{+2}	408	653	Cl^{-1}	8,3	191
K^{+1}	387	619	Na^{+1}	8,4	193
HCO^-	128	205	Mg^{+2}	5,0	155
Br^{-1}	66	106	$(\text{Al}, \text{Fe})_2 \text{O}_3$	4,0	92
H_3BO_3	27	43	K^{+1}	3,1	71
Sr^{+2}	14	22	NO_3^{-1}	1,3	30

Таблица 47.16

Растворимость газов ($\text{см}^3/\text{л}$) в морской и пресной воде в зависимости от температуры

Газ	В пресной воде при T				В морской воде, $S=35 ‰$ при T			
	0°C	10°C	20°C	30°C	0°C	10°C	20°C	30°C
N_2	18,10	14,60	12,24	10,98	14,04	11,72	10,18	9,08
O_2	10,29	8,02	6,57	5,57	8,04	6,41	5,35	4,50
Ar	0,54	0,42	0,35	0,30	0,41	0,31	0,25	0,21
CO_2	0,52	0,36	0,26	0,20	0,44	0,31	0,23	0,18
Всего. . .	29,45	23,40	19,42	17,05	22,93	18,75	16,01	13,97

Плотность и электропроводность воды

Плотность ρ морской воды. Плотность морской воды зависит от температуры, солености и давления. Зависимость ρ от солености определяется формулой

$$\sigma_0 = (-0,093 + 0,8149 S^0_{/‰} - 0,000482 S^2_{/‰} + 0,0000068 S^3_{/‰}) \text{ г/см}^3,$$

где

$$\sigma_0 = (\rho_0 - 1) 1000 \text{ г/см}^3 \quad \rho_0 = \rho_{T=0^\circ\text{C}}$$

Характерные для поверхности моря значения плотности, зависящие от температуры, находятся в пределах от $0,9960$ до $1,0283 \text{ г/см}^3$. Все значения плотности, зависящие от температуры, солености и давления, которые возможны в Мировом океане, укладываются в пределах $1,0757$ — $0,9960 \text{ г/см}^3$.

Разности плотности воды

Вода	Отклонение плотности от океанической, 10^{-4} г/см^3
Океаническая	0,0
Снеговая	-0,038
Дождевая	-0,025
Внутренних озер, рек, ручьев	-0,015
В живых организмах	-0,003
$^1\text{H}_2 \text{ } ^{16}\text{O}$	-2,6
В растениях	+0,002
В минералах	+0,009
В Мертвом море	+0,015

Таблица 47.17
Удельная электропроводность λ , 10^5 (сим/м), морской воды в зависимости от температуры и солености S

T, °C	S, ‰			
	10	20	30	40
0	923	1747	2528	3276
15	1378	2594	3740	4834
25	1712	3214	4626	5967

Физические свойства морского льда [26].

В высоких широтах различают глетчерный (образуется исключительно из осадков) и морской лед. Морская вода не имеет определенной точки замерзания. При общей солености воды 33‰ образование льда начинается при $-1,8^\circ\text{C}$. Но между кристаллами льда остается небольшое количество морской воды, в которой отдельные соли выкристаллизовываются при более низких температурах и только при -55°C полностью застывает образовавшийся рассол. Соленость и количество находящегося во льду воздуха определяет плотность морского льда.

Таблица 47.18
Плотность морского льда в зависимости от солености S и содержания в нем воздуха

Объемное содержание воздуха, %	S, ‰			
	0	10	20	30
0	0,918	0,925	0,934	0,942
3	0,890	0,898	0,906	0,914
6	0,863	0,871	0,879	0,887
9	0,835	0,843	0,851	0,859

Звук и свет в океане

Звук в океане [26]. Скорость звука определяется уравнением Лапласа $v = \sqrt{\gamma/\rho\kappa}$, где $\gamma = c_p/c_v$; ρ — плотность и κ — адиабатическая сжимаемость. Однако значения скорости звука, определенные по этой формуле, оказываются заниженными на 3—4 м/сек⁴. Номограммы значений скорости звука в морской воде приведены в [28].

В океане под гомогенным поверхностным слоем температура с глубиной сильно понижается, скорость звука также уменьшается, однако одновременное увеличение давления с глубиной влечет за собой некоторое повышение скорости звука. В зависимости от стратификации температуры и солености на глубинах 700—1300 м наблюдается минимум скорости звука. Отчетливые минимумы отсутствуют только там, где термическая стратификация незначительна (море Уэдделла и Красное).

Свет в океане [26]. При высоте Солнца более 40° море поглощает почти полностью падающий на него свет, а отражает менее 5%. При большом волнении и большом количестве пены на поверхности отражательная способность повышается и отражение может превысить 40% падающего излучения. С убыванием высоты Солнца отражение сильно возрастает.

Тепловой баланс океана

В сутки в море проникает $Q_{\text{сол}} = 295 \text{ кал/см}^2$, из них на прямую радиацию приходится 64% и на диффузную 44%.

Таблица 47.19
Коэффициент преломления света в морской воде в зависимости от длины волны λ и солености S [29]

λ , мμ	S, ‰			
	0	10	20	35
667,8	1,33087	1,33271	1,33452	1,33726
587,6	1,33305	1,33491	1,33675	1,33951
501,6	1,33635	1,33824	1,34011	1,34293
447,2	1,33945	1,34138	1,34329	1,34616

Расход тепла с поверхности моря в процентах от $Q_{\text{сол}}$ приходится на подводную освещенность — 2%, на отражение — 6%, на тепловую энергию эффективного излучения поверхности — 42%, на конвекцию — 7%, на испарение — 51%. Менее значительными составляющими теплового баланса Мирового океана являются: приход тепла в результате химико-биологических реакций — 0,1%, приход тепла от трения — 0,05% и приход тепла от распада радиоактивных веществ в морской воде — 0,000017%. Приход тепла из внутренних частей Земли — 0,03%.

Проникающая в море тепловая энергия используется почти исключительно в тонком приповерхностном слое. В чистой океанической воде уже в самом верхнем сантиметровом слое поглощается 27% радиации, в метровом слое — 62% и только 0,45% всей энергии доходит до глубины 100 м.

Таблица 47.20
Нагревание ($^\circ\text{C}$) слоя воды толщиной 1 м на различных глубинах при поглощении 1000 кал/см²

Залегание слоя, м	Вода	
	чистая океаническая	мутная прибрежная
0—1	6,24	7,72
1—2	0,610	0,960
5—6	0,236	0,120
10—11	0,104	0,014
20—21	0,040	0,000

47.4. АТМОСФЕРА

Строение атмосферы

Атмосфера на своем протяжении не является однородной. Особенно резко ее свойства изменяются по вертикали. По составу, температурному режиму, электрическим характеристикам атмосфера в вертикальном направлении может быть разделена на ряд слоев. Особенно отчетливо различия в свойствах этих слоев проявляются в распределении температуры по высоте.

Прилегающий к Земле слой — *тропосфера* — характеризуется уменьшением температуры с высотой (порядка 6 град/км) и кончается *тропопаузой* на высоте от 7 км на полюсе до 17 км на экваторе. Выше лежит *стратосфера*, где температура возрастает приблизительно от 200°K в тропопаузе до 280°K в *стратопоаузе* (на высоте 50 км). Далее следует *мезосфера*, где температура уменьшается с высотой до $170\text{—}180^\circ\text{K}$ на высоте около 85 км (*мезопоауза*).

Эти три слоя: тропосфера, стратосфера и мезосфера характеризуются неизменным газовым составом и носят общее название *гомосферы*.

Начиная с 85 км температура атмосферы вновь возрастает вследствие поглощения ультрафиолетовой радиации Солнца. Средний градиент температуры равен 20 град/км до высоты 150 км, а далее рост ее постепенно замедляется и заканчивается на высоте 300 км. Эта область атмосферы называется *термосферой* и заканчивается *термопаузой*, которая лежит днем на высоте 350—450 км, а ночью опускается на высоту 200—250 км. Термосфера и лежащий над ней обширный слой *метасферы* носят общее название *гетеросферы*, так как характеризуются гравитационным разделением газов. Благодаря этому разделению на высоте около 750 км преобладает атомарный кислород, а на высоте 1500 км — гелий.

Разделение газов заканчивается на высоте в несколько тысяч километров переходом к водородному составу атмосферы. Чтобы выделить область, где столкновения между молекулами не мешают их вылету за пределы земной атмосферы, вводят термин *экзосфера*. Экзосфера лежит выше 700 км. На высотах до 200 000 м по характеру изменения температуры атмосфера делится на одиннадцать слоев. Общим свойством всех слоев является линейность изменения молекулярной температуры T_m , °К, по геопотенциальной высоте Φ , выражаемой в геопотенциальных метрах (*гп. м*). Геопотенциальная (Φ) и геометрическая (z) высоты связаны соотношением $\Phi = rz/(r + z)$, где $r = 6\,371\,210$ м — средний радиус Земли.

Молекулярная температура T_m связана с кинетической T следующей зависимостью:

$$T_m = T_0 \cdot \frac{M_0}{M_z},$$

где M_0 и M_z — молекулярные массы воздуха на уровне моря и на рассматриваемой высоте соответственно. Для расчетов приняты следующие значения физичес-

ких характеристик атмосферы на уровне моря и физических констант:

Барометрическое давление на географической широте $\varphi = 45^\circ 32' 40''$ при температуре ртути $273,15^\circ \text{К}$ и средней плотности ртути $13595,1 \text{ кг/м}^3$:

$$P_0 = 1013,25 \text{ мбар} = 760 \text{ мм рт. ст.}$$

$$\text{Температура } T_0 = 15^\circ \text{С} = 288,15^\circ \text{К.}$$

Газовая постоянная сухого воздуха:

$$\text{универсальная} \dots \dots \dots 3,31436 \cdot 10^7 \text{ эрг/(град} \cdot \text{моль)};$$

$$\text{удельная} \dots \dots \dots 2,87039 \cdot 10^6 \text{ эрг/(град} \cdot \text{г)}.$$

Динамическая вязкость воздуха при $T = 273^\circ \text{К}$:

$$\mu_0 = 1,75 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{сек/м}^2 = 1716,16 \cdot 10^{-7} \text{ пз.}$$

$$\text{Ускорение силы тяжести } g_0 = 980,665 \text{ см/сек}^2.$$

Стандартная атмосфера

По многочисленным данным, полученным прямыми и косвенными методами, определены характеристики некоторой средней, или стандартной атмосферы.

Барометрическая формула [24]. Для определения разности высот $z_2 - z_1$ между двумя точками, давление в которых равно P_2 и P_1 , можно воспользоваться барометрической формулой Лапласа:

$$z_2 - z_1 = 18\,400 (1 + 0,00366 \bar{t}) \cdot [1 + 0,378 (\bar{e}/p)] \times \\ \times (1 + 0,00264 \cos 2\varphi) (1 + 3,14 \cdot 10^{-7} \bar{h}) \lg(P_1/P_2).$$

где $\bar{t}$, $\bar{h}$, $(\bar{e}/p)$ — средние значения температуры, высоты над уровнем моря и отношения парциального давления водяного пара к атмосферному. Если пренебречь зависимостью силы тяжести от широты и высоты и считать воздух сухим, можно воспользоваться упрощенной барометрической формулой:

$$z_2 - z_1 = 18\,400 (1 + 0,00366 \bar{t}) \lg(P_1/P_2).$$

Т а б л и ц а 47.21

Состав атмосферного воздуха [29, 24]

Вещество	Молекулярная масса, а.е.м.	Объемное содержание, %	Число молекул на 1 см ² вертикального столба
N ₂	28,0134	78,084 ± 0,004	1,678 · 10 ²⁵
O ₂	31,998	20,946 ± 0,002	4,501 · 10 ²⁴
Ar	39,948	0,934 ± 0,001	2,007 · 10 ²³
CO ₂	44,009	0,030 ± 0,003	7,09 · 10 ²¹
Ne	20,179	(1,818 ± 0,004) 10 ⁻³	3,89 · 10 ²⁰
He	4,0026	(5,24 ± 0,004) 10 ⁻⁴	1,13 · 10 ²⁰
CH ₄	16,043	~ 2,2 · 10 ⁻⁴	—
Kr	83,80	(1,14 ± 0,01) · 10 ⁻⁴	2,45 · 10 ¹⁹
NO ₂	46,005	(0,5 ± 0,1) 10 ⁻⁴	—
H ₂	2,0158	~ 0,5 · 10 ⁻⁴	—
Xe	131,30	(8,7 ± 0,1) 10 ⁻⁶	1,87 · 10 ¹⁸
Озон	—	(0 — 0,07) 10 ⁻⁴	—
Сухой воздух	28,966	100,0	2,149 · 10 ²⁵

Высота z , км	Молеку- лярная масса, а. е. м	Температура, °К		Градиент молекулярной температуры, °К/гн. м.	Высота z , км	Молеку- лярная масса, а. е. м	Температура, °К		Градиент молекулярной температуры, °К/гн. м.
		молекулярная	кинетическая				молекулярная	кинетическая	
0	28,966	288,15	288,15	-0,00651122	110	28,934	257,64	257,36	0,00801741
11	28,966	216,66	216,66	0	120	28,727	335,00	332,24	0,02345357
25	28,966	216,66	216,66	0,00276098	150	28,107	1010,00	980,05	0,01987408
46	28,966	247,00	247,00	0	160	27,900	1199,40	1155,26	0,00308461
54	28,966	274,00	274,00	-0,00349544	170	27,700	1228,71	1175,00	0,00308461
80	28,966	185,00	185,00	0	180	27,476	1257,93	1193,20	0,00308461
95	28,966	185,00	185,00	0,00500000	190	27,245	1287,06	1210,60	0,00308461
					200	27,000	1316,10	1226,80	0,00308461

Таблица стандартной атмосферы

Таблица 47.23

Геометри- ческая высота z , км	Температура, °К	Барометриче- ское давление, мм рт. ст.	Плотность, кг/м ³	Скорость звука, м/сек	Вязкость			Средняя длина свободного пробега мо- лекул l , 10^{-8} м
					динамическая μ , 10^{-4} пз	кинематическая ν , 10^{-6} м ² /сек	г, м/сек ²	
-2	301,19	958,50	1,4781	347,90	1,8517	1,2528	9,81281	5,3471
-1,5	297,93	905,30	1,4114	346,01	1,8362	1,3010	9,81127	5,5833
-1	294,67	854,52	1,3469	344,11	1,8207	1,3517	9,80973	5,8329
-0,5	291,42	806,21	1,2850	342,21	1,8051	1,4048	9,80819	6,0957
0	288,15	760,00	1,2250	340,28	1,7894	1,4607	9,80665	6,3741
0,5	284,90	715,96	1,1672	338,36	1,7736	1,5196	9,80511	6,6688
1	282,65	674,12	1,1117	336,43	1,7578	1,5812	9,80357	6,9791
1,5	278,40	634,30	1,0582	334,48	1,7420	1,6461	9,80203	7,3079
2	275,14	596,28	1,0066	332,52	1,7260	1,7146	9,80049	7,6572
2,5	271,89	560,24	0,95706	330,55	1,7099	1,7866	9,79896	8,0260
3	268,64	525,98	0,90941	328,56	1,6937	1,8624	9,79742	8,4170
3,5	265,38	493,35	0,86345	326,56	1,6773	1,9426	9,79588	8,8333
4	262,13	462,46	0,81942	324,56	1,6610	2,0271	9,79435	9,2744
4,5	258,88	433,15	0,77714	322,54	1,6446	2,1162	9,79281	9,7426
5	255,63	405,37	0,73654	320,51	1,6280	2,2103	9,79128	10,240
5,5	252,38	379,04	0,69758	318,47	1,6114	2,3100	9,78974	10,771
6	249,13	354,13	0,66022	316,41	1,5946	2,4153	9,78820	11,335
6,5	245,88	330,54	0,62441	314,34	1,5778	2,5268	9,78667	11,936
7	242,63	308,26	0,59010	312,25	1,5609	2,6452	9,78514	12,579
7,5	239,38	287,20	0,55725	310,15	1,5439	2,7705	9,78360	13,264
8	236,14	267,38	0,52591	308,05	1,5267	2,9030	9,78207	13,994
8,5	232,89	248,62	0,49585	305,92	1,5095	3,0443	9,78053	14,777
9	229,64	230,95	0,46712	303,78	1,4922	3,1942	9,77900	15,614
9,5	226,40	214,36	0,43977	301,63	1,4747	3,3534	9,77747	16,509
10	223,15	198,70	0,41357	299,45	1,4571	3,5232	9,77594	17,471
11	216,66	170,19	0,36485	295,07	1,4217	3,8966	9,77287	19,610
12	216,66	145,44	0,31180	295,07	1,4217	4,5595	9,76981	22,946
13	216,66	124,30	0,26648	295,07	1,4217	5,3351	9,76675	26,849
14	216,66	106,24	0,22776	295,07	1,4217	6,2420	9,76369	31,413
15	216,66	90,810	0,19467	295,07	1,4217	7,3029	9,76063	36,752
16	216,66	77,616	0,16640	295,07	1,4217	8,5437	9,75758	42,996
17	216,66	66,350	0,14224	295,07	1,4217	9,9952	9,75452	50,301
18	216,66	56,719	0,12159	295,07	1,4217	11,692	9,75146	58,840
19	216,66	48,489	0,10395	295,07	1,4217	13,676	9,74842	68,825
20	216,66	41,455	0,088870	295,07	1,4217	15,997	9,74437	80,505
22	216,66	30,305	0,064966	295,07	1,4217	21,883	9,73927	110,13
24	216,66	22,158	0,047501	295,07	1,4217	29,929	9,73318	150,62
26	216,40	16,219	0,034336	296,93	1,4367	41,842	9,72710	209,25
28	224,87	11,959	0,024701	300,61	1,4665	59,370	9,72102	293,27
30	230,35	8,8777	0,017901	304,25	1,4959	83,565	9,71494	407,86
35	244,01	4,3522	8,2842 · 10 ⁻³	313,14	1,5681	189,29	9,69978	897,62
40	257,66	2,2191	4,0003 · 10 ⁻³	321,78	1,6384	409,56	9,68466	1890,0
45	271,28	1,1732	2,0086 · 10 ⁻³	330,17	1,7068	849,77	9,66957	3821,8
50	274,00	0,63441	1,0754 · 10 ⁻³	331,82	1,7203	1599,7	9,65452	7158,5
60	253,40	0,18092	3,3162 · 10 ⁻⁴	319,11	1,6166	4874,9	9,62452	22 684
70	219,15	0,043761	9,2747 · 10 ⁻⁵	296,76	1,4353	1547,5	9,59466	77 433
80	185,00	0,0083564	2,0979 · 10 ⁻⁵	272,66	1,2420	59202	9,56494	322 410
90	185,00	0,013834	3,4733 · 10 ⁻⁶	272,66	1,2420	35759	9,53536	194 7400

Рекомендуемые физические характеристики для высот от 95 000 до 300 000 м

Геометрическая высота, км	Температура, °K	Барометрическое давление, мм рт. ст.	Плотность, кг/м³	Молекулярная масса, а. е. м.	Ускорение свободного падения тела, м/сек²
95	185,00	5,6408·10 ⁻⁴	1,4170·10 ⁻⁶	28,996	9,52061
100	209,22	2,4310·10 ⁻⁴	5,3993·10 ⁻⁷	28,962	9,50591
105	233,36	1,1504·10 ⁻⁴	2,2900·10 ⁻⁷	28,952	9,49121
110	257,36	5,8671·10 ⁻⁵	1,0583·10 ⁻⁷	28,934	9,47660
115	294,97	3,2314·10 ⁻⁵	5,0674·10 ⁻⁸	28,831	9,46199
120	332,24	1,9165·10 ⁻⁵	2,6586·10 ⁻⁸	28,727	9,44741
125	442,64	1,2555·10 ⁻⁵	1,3025·10 ⁻⁸	28,624	8,43288
130	552,04	9,0540·10 ⁻⁶	7,5055·10 ⁻⁹	28,520	9,41839
135	660,51	6,9357·10 ⁻⁶	4,7873·10 ⁻⁹	28,417	9,40390
140	768,00	5,5394·10 ⁻⁶	3,2766·10 ⁻⁹	28,314	9,38948
145	874,48	4,5608·10 ⁻⁶	2,3605·10 ⁻⁹	28,210	9,37507
150	980,05	3,8428·10 ⁻⁶	1,7682·10 ⁻⁹	28,107	9,36069
155	1068,1	3,2937·10 ⁻⁶	1,3855·10 ⁻⁹	28,003	9,3437
160	1155,3	2,8598·10 ⁻⁶	1,1081·10 ⁻⁹	27,900	9,33205
165	1165,6	2,4996·10 ⁻⁶	9,5683·10 ⁻¹⁰	27,810	9,31671
170	1175,0	2,1887·10 ⁻⁶	8,2787·10 ⁻¹⁰	27,700	9,30240
175	1184,2	1,9200·10 ⁻⁶	7,1767·10 ⁻¹⁰	27,588	9,28821
180	1193,2	1,6872·10 ⁻⁶	6,2332·10 ⁻¹⁰	27,476	9,27400
185	1202,0	1,4850·10 ⁻⁶	5,4236·10 ⁻¹⁰	27,361	9,25983
190	1210,6	1,3093·10 ⁻⁶	4,7276·10 ⁻¹⁰	27,245	9,24570
195	1218,9	1,1562·10 ⁻⁶	4,1282·10 ⁻¹⁰	27,125	9,23159
200	1226,8	1,0226·10 ⁻⁶	3,6109·10 ⁻¹⁰	27,000	9,21750
205	1236,0	9,0586·10 ⁻⁷	3,1603·10 ⁻¹⁰	26,875	9,20347
210	1245,0	8,0379·10 ⁻⁷	2,7709·10 ⁻¹⁰	26,750	9,18950
215	1253,7	7,1435·10 ⁻⁷	2,4336·10 ⁻¹⁰	26,620	9,17548
220	1262,0	6,3585·10 ⁻⁷	2,1412·10 ⁻¹⁰	26,487	9,16150
225	1269,9	5,6684·10 ⁻⁷	1,8870·10 ⁻¹⁰	26,348	9,14762
230	1277,4	5,0606·10 ⁻⁷	1,6656·10 ⁻¹⁰	26,205	9,13370
235	1284,4	4,5245·10 ⁻⁷	1,4726·10 ⁻¹⁰	26,055	9,11989
240	1290,9	4,0508·10 ⁻⁷	1,3039·10 ⁻¹⁰	25,899	9,10610
245	1297,0	3,6317·10 ⁻⁷	1,1563·10 ⁻¹⁰	25,739	9,09228
250	1302,8	3,2604·10 ⁻⁷	1,0270·10 ⁻¹⁰	25,577	9,07850
255	1309,5	2,9311·10 ⁻⁷	9,1190·10 ⁻¹¹	25,392	9,06480
260	1316,2	2,6390·10 ⁻⁷	8,1111·10 ⁻¹¹	25,213	9,05110
265	1322,6	2,3794·10 ⁻⁷	7,2256·10 ⁻¹¹	25,033	9,03744
270	1328,8	2,1481·10 ⁻⁷	6,4465·10 ⁻¹¹	24,854	9,02380
275	1334,6	1,9421·10 ⁻⁷	5,7605·10 ⁻¹¹	24,672	9,01021
280	1340,0	1,7581·10 ⁻⁷	5,1548·10 ⁻¹¹	24,488	8,99660
285	1344,9	1,5936·10 ⁻⁷	4,6195·10 ⁻¹¹	24,299	8,98309
290	1349,5	1,4465·10 ⁻⁷	4,1463·10 ⁻¹¹	24,110	8,96960
295	1353,9	1,3142·10 ⁻⁷	3,7253·10 ⁻¹¹	23,920	8,95610
300	1358,0	1,1956·10 ⁻⁷	3,3521·10 ⁻¹¹	23,731	8,94270

Радиационный баланс атмосферы

Средний радиационный баланс Северного полушария при средних условиях облачности [31]:

Составляющие радиационного баланса Поток энергии, кал/(см² · мин)

Коротковолновая радиация:

Инсоляция на верхней границе атмосферы 0,500

Поглощение радиации в атмосфере (общее) 0,087

озоном 0,014

водяным паром и пылью 0,065

облаками 0,008

Отражение и рассеяние радиации в мировом пространстве (общее) 0,176

атмосферой 0,034

облаками 0,121

земной поверхностью 0,021

Поглощение радиации земной поверхностью (общее) 0,237

прямой солнечной 0,112

пропущенной облаками 0,072

рассеянной 0,053

Длинноволновая радиация (общее излучение) 0,324

Эффективное излучение земной поверхности:

тепловое излучение 0,572

противоизлучение атмосферы 0,482

эффективное излучение 0,090

Тепловое излучение тропосферы:

тепловое излучение, поглощенное тропосферой 0,545

собственное тепловое излучение тропосферы 0,765

Тепловое излучение в мировое пространство земной поверхности (в «окнах прозрачности»)	0,027
тропосферы	0,283
стратосферы	0,014

Поглощение лучистой энергии в атмосфере [24]. Основную роль в поглощении лучистой энергии в атмосфере играют кислород, озон, углекислый газ, водяной пар и пыль. В целом атмосферой поглощается 17—25% солнечной радиации. Кислород имеет полосы поглощения главным образом в ультрафиолетовой части спектра.

В видимой части поглощение происходит в полосах *A* с центром около 0,76 мкм и *B* с центром около 0,69 мкм, однако поглощение в них мало и слабо влияет на ослабление радиации.

Озон образуется в результате поглощения солнечной радиации ($\lambda < 2420 \text{ \AA}$) на высотах от 10 до 60 км с центром поглощения около 22 км. Основные полосы поглощения озона лежат также в ультрафиолетовой области, следствием чего является то, что наблюдаемый у земной поверхности спектр обрывается на длине волны $\sim 3000 \text{ \AA}$. В этой области спектра поглощение озона солнечной радиации составляет около 2—3% всего интегрального потока.

Наиболее важной полосой поглощения углекислого газа является широкая полоса 12,9—17,1 мкм, расположенная в максимуме теплового излучения атмосферы.

Важнейшее значение в поглощении лучистой энергии в атмосфере имеет водяной пар. Это определяется не только большим его содержанием, но и очень большим числом линий и полос в его спектре. Наибольшее значение из них имеют полосы, расположенные в инфракрасной области спектра.

Полосы поглощения водяного пара

Обозначение полосы	α	β	ρ	σ	φ	ψ	Ω
Центр полосы λ , мкм	0,72	0,82	0,93	1,13	1,38	1,86	
Обозначение полосы	ω_1	ω_2	χ	—	—	γ	
Центр полосы λ , мкм	2,01	2,05	2,68	3,2—4,0	—	4,0—4,9	

В видимой области наиболее сильны две полосы: α 7300—6850 $\text{\AA}$ и «дождевая» полоса 6060—5850 $\text{\AA}$.

Таблица 47.25

Альbedo различных поверхностей.

Поверхность	Альbedo, %	Поверхность	Альbedo, %
Чернозем:		Вспаханное поле:	
сухой	14	сухое	8—12
влажный	8	влажное	5—7
Серозем:		Рожь и пшеница	10—25
сухой	25—30	Трава:	
влажный	10—12	свежая	26
Глина синяя:		высохшая	19
сухая	23	Древесная растительность	10—18
влажная	16		
Песок желтый:			
сухой	35		
серый	18—23		
речной	43		

Отражение солнечной радиации [24]. Альbedo-интегральное отношение отраженного по всем направлениям потока к потоку, упавшему на отражающую поверхность Земли, близко к 40%, причем основной вклад (75%) вносит альbedo облаков, а наименьшее значение (7%) имеет альbedo земной поверхности. Остальную часть составляет альbedo атмосферы.

Электрические явления в атмосфере

Ионы в атмосфере [24]. В результате ионизации газов, входящих в состав атмосферы, образуются первичные (молекулярные) ионы и устойчивые комплексы из 10—15 молекул (легкие ионы). Путем присоединения легких ионов к частицам аэрозоля образуются более крупные — тяжелые и ультратяжелые ионы. Обнаруживаются также средние или промежуточные ионы, природа которых не вполне ясна.

Капли тумана и облачных элементов имеют размеры 10^{-4} — 10^{-3} см и могут иметь заряд, но к числу ионов обычно не относятся. Как правило, каждый ион несет один элементарный заряд, если его радиус меньше 10^{-6} см.

Из многочисленных известных ионизаторов главнейшими для нижних слоев атмосферы являются излучения радиоактивных веществ, содержащихся в земной коре и атмосфере, а также космические лучи. Над океанами основным ионизатором является космическое излучение.

Таблица 47.26

Основные группы атмосферных ионов

Группа ионов	Подвижность, $\text{см}^2/(\text{в} \cdot \text{сек})$	Радиус иона, $\text{\AA}$
Легкие	10^{-2} —1	6,6—80
Средние	10^{-3} — 10^{-2}	80—250
Тяжелые	10^{-3} — $2,5 \cdot 10^{-3}$	250—550
Ультратяжелые	$\leq 2,5 \cdot 10^{-3}$	> 550

Таблица 47.27

Число ионов, возникающих за 1 сек, в 1 см³ воздуха [30]

Расположение воздушной массы	Ионизатор			Итого
	Излучение радиоактив- ных элементов		Космичес- кое излу- чение	
	почвы	воздуха		
Над сушей	4,0	4,6	1,5—1,8	10,1—10,4
Над океаном	—	—	1,5—1,8	1,5—1,8

Проводимость воздуха [30]. Средняя удельная проводимость воздуха $\lambda = 2 \cdot 10^{-4}$ ед. СГСЭ (над сушей от $0,2 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-4}$ ед. СГСЭ в зависимости от помутнения атмосферы и содержания радиоактивных элементов в земной коре). Близ населенных пунктов она уменьшается (близ Лондона $\lambda = 0,35 \cdot 10^{-4}$ ед. СГСЭ, на Шпиц-

бергене $\lambda = 4,95 \cdot 10^{-4}$ ед. СГСЭ). Проводимость нижних слоев атмосферы более чем на 95% обусловлена легкими ионами.

Над сушей у земной поверхности концентрация тяжелых ионов в 10 — 100 раз больше, чем легких.

Электрическое поле в атмосфере. [24]. Почти всегда вертикальная составляющая электрического поля в атмосфере значительно превосходит его горизонтальные составляющие, что соответствует отрицательному заряду земной поверхности. Средняя поверхностная плотность электрического заряда Земли равна $dQ/ds = -3,45 \cdot 10^{-4}$ ед. СГСЭ/ $см^2$. Полный заряд Земли равен $Q = -17 \cdot 10^{14}$ ед. СГСЭ $= -5,7 \cdot 10^5$ к. Приведенные значения получены в предположении, что средний вертикальный градиент электрического потенциала у земной поверхности равен 130 в/м.

Электрические заряды осадков. Частицы осадков всех видов несут на себе электрические заряды, которые возникают в результате нескольких групп процессов электризации, в числе которых соударение поларизованных частиц, захват частицами осадков воздушных ионов, разбрызгивание капель воды, электризация при изменении агрегатного состояния.

Таблица 47.28

Электрический заряд Q осадков различного происхождения и ток I , создаваемый ими [24]

Характер осадков	$Q_{ср}, \kappa$	$Q_{макс}, \kappa$	$I_{ср}, а$	$I_{макс}, а$
Обложной дождь .	$10^{-15} — 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-15}$	$5 \cdot 10^{-14}$
Ливневый дождь .	$10^{-13} — 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-12}$
Град . . .	10^{-11}	10^{-10}	—	$1 \cdot 10^{-11}$
Снег . . .	$10^{-12} — 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-13}$

Заряд отдельных капель меняется в очень широких пределах. Число положительно заряженных капель в среднем в 1,5 раза больше числа отрицательно заряженных. Это отношение меняется от 1 : 1 до 3 : 1. В то же время средний отрицательный заряд на одну каплю ($1,3 \cdot 10^{-12}$ к) больше положительного ($1,1 \cdot 10^{-12}$ к). Капли обложного дождя заряжены до 0,5—10 в, у грозового ливня до 300 в при среднем значении 40 в.

Стратификация атмосферы в зависимости от степени ионизации [30]

Наблюдения за распространением радиоволн показали, что газы, образующие атмосферу, ионизованы. Известны четыре регулярно наблюдаемых более или менее ярко выраженных слоя: D , E , F_1 и F_2 .

Слой E и F_2 непрерывны и простираются над всем земным шаром, а слои D и F_1 регулярно появляются лишь в определенное время суток и года. Кроме того, в области непрерывных слоев E и F_2 время от времени появляются спорадические слои $E_{спор}$ и $F_{2спор}$, представляющие собой отдельные облака с большой концентрацией ионов и электронов. Нижняя граница ионосферы совпадает с началом слоя D . Число электронов в $1 см^3$ составляет несколько тысяч. Слой D отражает длинные (в несколько километров) волны; при наклонном падении частично отражает и заметно поглощает короткие волны (30—100 м) и сильно поглощает волны длиной 100—500 м.

На высоте от 85—90 км до 130—140 км располагается слой E — постоянно существующая область ионизации с максимумом концентрации электронов (до $\sim 2 \cdot 10^5 см^{-3}$) на высоте 120—130 км. Ночью концентрация электронов уменьшается по $5 \cdot 10^3 см^{-3}$. Слой E днем

отражает и заметно поглощает волны длиннее 10 м, а при наклонном падении отражает более короткие (15—20 м). На уровне максимальной концентрации электронов слоя E находится нижняя граница полярных сияний.

На высоте 200—500 км в области слоев F_1 и F_2 наблюдается наибольшая концентрация электронов. Слой F_1 образуется только летом в дневные часы в нормальных условиях на высоте 180—220 км. Максимальная концентрация электронов в слое F_1 составляет $(2 \div 5) 10^5 см^{-3}$. Слой F_1 существенно влияет на распространение коротких волн. Максимальная концентрация электронов в слое F_2 составляет несколько миллионов в $1 см^3$. Высота зоны максимальной концентрации 200—400 км. Состояние слоя F_2 оказывает решающее влияние на радиоволны в диапазоне 10—200 м.

Выше максимума слоя F_2 концентрация ионов и электронов очень медленно уменьшается с высотой, приближаясь на высотах 2000—3000 км к состоянию межпланетного газа (10^3 — $10^2 см^{-3}$).

Ионизация верхней атмосферы в сильной степени определяется влиянием Солнца; степень ионизации изменяется со временем суток, с сезоном и фазой цикла солнечной активности. Сильное влияние на ионизацию оказывает также бомбардировка атмосферы частицами солнечного происхождения, вызывающими магнитные бури и полярные сияния. Область E предположительно соответствует области диссоциации $O_2 \rightarrow O + O$, а область D — ионизации O_2 , соответствующей первому потенциалу ионизации. Максимумы ионизации областей F_1 и F_2 располагаются примерно на высотах 200 и 275 км соответственно. В течение ночи области F_1 и F_2 сливаются, образуя один слой ионизации. Слой D ночью исчезает, а слой E заметно рассасывается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гутенберг Б. Физика земных недр. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
2. Харлей П. М. Возраст Земли. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1962.
3. Джеффрис Г. Земля, ее происхождение, история и развитие. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
4. Федынский В. В. Разведочная геофизика. М., «Недра», 1964.
5. Косминская И. П. «Вестник АН СССР», 1965, т. 2, с 51.
6. Польдерварт А. В сб.: Земная кора. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1957, с. 130.
7. Берч Ф. См. [6], с. 114.
8. Ферсман А. Е. Геохимия. М., ОНТИ, 1933—1939 г., т. 1—4.
9. Чердынцев В. В. Распространенность химических элементов. М., Гостехиздат, 1956.
10. Жонголович И. Л. В кн.: Труды ЦНИИГеодезии, аэрофотоъемки и картографии, 1948, вып. 68.
11. Cassinis G. «Bull. Géodésique», 1928, v. 25, с. 117.
12. Коронин Л. В. Гравиметрия и гравиметрическая разведка. М., Гостехиздат, 1948.
13. Саваренский Е. Ф., Кирос Д. П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М., Гостехиздат, 1955.
14. ГОСТ СССР 6249—52.
15. Землетрясения в СССР. М., Изд-во АН СССР, 1961.
16. Тверской П. Н. Курс геофизики. Л., Гидрометеоиздат, 1939.
17. Проскурякова Т. А., Рыкунов Л. Н. В сб.: Международный геофизический год. Т. 5, М., «Наука», 1963.
18. Melton B. S., Jonson D. P. «Proc. JBB», 1962, v. 50, N 11, p. 2328.

19. Яновский Б. М. Земной магнетизм. М., Гостехиздат, 1953.
20. Афанасьева Е. И. «Изв. АН СССР. Сер. геофиз.», 1947, т. 2, с. 55.
21. Справочник по переменному магнитному полю Земли. Л., Гидрометеиздат, 1954.
22. Краев А. П. Основы геоэлектрики. Л., Изд-во ЛГУ, 1950.
23. Виноградов П. А. «Геология и геофизика», 1963, № 12, с. 111.
24. Тверской П. Н. Курс метеорологин. Л., Гидрометеиздат, 1962.
25. Бруевич С. В. Элементарный состав воды Мирового Океана.— В кн.: «Труды Ин-та Океанологии АН СССР. Т. 2. М., «Наука», 1948.
26. Дитрих Г., Колле К. Общее мореведение. Л., Гидрометеиздат, 1961.
27. Zubov N. N. Океанологические таблицы. Л., Гидрометеиздат, 1957.
28. Баррс Л. С. Таблицы скорости звука в морской воде. М., Изд-во Выч. Центра АН СССР, 1961.
29. Николс М. Аэрономия. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1964.
30. Аверкиев М. С. Метеорология. М., Изд-во МГУ, 1960, т. 2.
31. Будыко М. И., Кондратьев И. Я. «Космические исследования», 1964, т. 2, вып. 1, с. 62.
32. Карты напряженности магнитного поля Земли Института земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн. Л., Ленингр. отд., 1964.
33. Jacobs J. I. The Earth Interior.— "Encycl. of Physics". Ed. E. S. Flügge. Springer-Verlag, Berlin v. 47, 1956.

ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Справочник

Под редакцией академика
И. К. Кикоина

Редакторы *Ю. С. Аборин, Т. С. Лим*
Художественный редактор *А. Т. Кирьянов*
Переплет художника *А. С. Александрова*
Технический редактор *Н. А. Власова*
Корректоры *Н. А. Смирнова и*
Л. С. Тимохова

Сдано в набор 31.1. 1975 г. Подписано к печати 2.11. 1976 г. Т-03231, Т-03234. Формат 84×108/16. Бумага типографская № 1. Усл. печ. л. 105,84. Уч.-изд. л. 127,06. Тираж 28 000 экз. Цена 7 р. 16 коп. Зак изд. 1345. Зак. тип. 748.

Атомиздат 103031 Москва К-31, ул. Жданова, 5.

Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 150014, Ярославль, ул. Свободы, 97.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

На базах и складах Союзкниги и издательства имеется следующая литература:

Коэффициенты перевода единиц измерения физико-технических величин. 1967 г. 40 стр., 0—08 коп.

Заказы принимают все книжные магазины, распространяющие научно-техническую литературу. В Москве обращайтесь по адресу: Москва, 103031, ул. Петровка, 15, магазин № 8, отдел «Книга почтой».

АТОМИЗДАТ

